浙江大学

博 士 学 位 论 文

论文题目： 电磁全可变气门的仿真控制及相关研究

作者姓名 王 希 珍

指导教师 严 兆 大 教授

学科(专业) 动力机械及工程

所在学院 机械与能源学院

提交日期：2003 年 11 月

A Dissertation submitted for the Ph.D.

The Simulation Control and Correlation Studies of Electromechanical Valve Actuator

Major: Power Machinery and Engineering

Ph.D.Candidate: Wang Xizhen

Supervisor: Prof. Yan Zhaoda

College of Mechanism and Energy Engineering of Zhejiang University

November 2003

摘　　要

随着对发动机性能和排放要求的不断提高，使得可变气门机构（VVT）的开发和应用变得非常迫切。但是至今为止还没有一个机构既能满足最大限度地发挥可变气门的功能和效益，又能像传统配气机构那样正常可靠地工作。电磁全可变气门技术（EMVA）是可变配气相位技术发展的最新进展之一，它能够很好地满足上述要求，是实现发动机低能耗和低污染的发展目标的一个非常有效的途径。国外许多著名大学和公司都投入了大量的人力物力进行 EMVA 的研究开发，但到目前为止，无论是结构还是控制方面的技术都不够成熟，距实用尚有较大距离，还需要进一步的发展完善。

本研究是在大量阅读国内外有关文献资料的基础上，结合与一汽集团无锡油泵油嘴研究所合作的电磁可变气门机构课题的实际情况，采用模型分析、仿真计算与试验测试相结合的研究模式，对EMVA系统进行了较为系统和深入的研究，已经初步取得了一些明显的效果。

论文主要工作：

1. 分析电磁全可变气门系统的数学模型，利用MATLAB/SIMULINK软件进行仿真计算，通过研究电磁气门系统的工作机理，揭示电磁阀各种工作参数对其工作响应过程的影响规律，以便对电磁阀的设计制作提供可靠的参数和依据。计算机仿真用于开发和优化EMVA系统可以减少试验次数，节省大量资源和时间，不仅具有试验无法相比的低成本、短开发周期等优越性，同时还便于对各种参数对电磁气门的影响进行研究。在仿真计算结果基础上及借鉴国外的开发经验，首次设计了一套利用高电阻率的硅钢片作为磁导体的电磁全可变气门机构，可以在现有条件下最大限度地降低磁滞和涡流损耗。

2. 针对EMVA机构的数学模型，在国内首次进行了该机构的控制理论研究，比较了PID控制和反馈－前馈迭代学习控制的仿真结果，反馈－前馈迭代学习控制方法比PID控制方法具有明显的优越性。它能够很好地对期望轨迹进行快速完全的跟踪，并且能在理论上解决软着陆的问题，为解决EMVA机构走向实用化的最大障碍——软着陆问题，提供了一个切实可行的方法。

3. 对EMVA系统的电控单元（ECU）进行了软硬件设计。其中，硬件设计包括单片机及仿真器的选择、传感器的选择、驱动电路的设计等。软件设计给出了ECU

软件要求、软件结构框图、软件总流程及各模块的分析设计过程。

4. 首次研制了电磁全可变气门的动态试验测试系统，为EMVA系统的深入研究提供了有效的工具。利用测试系统分析和探讨了EMVA机构的电磁特性及其工作过程中物理参量的变化规律。在此基础上，提出了电磁全可变气门及其测试系统的改进设计方法。试验结果表明，研制的测试系统具有良好的工作性能，能够基本实现对EMVA机构的静态和动态工作过程的控制测试；设计的EMVA机构能够满足系统强电磁力特性的要求，但在响应速度和软着陆方面还需要进一步的改进。

关键词： 电磁全可变气门、仿真、反馈－前馈迭代学习控制、电控单元、驱动电路、测试系统

Abstract

As the engine becoming more intensify and its speed increasing more quickly, the development and application of variable valve train getting more and more urgently. But up to now there is no valve train can satisfy the requirements of exploit the maxim advantages of variable valve train as well as working with high efficiency as the conventional admission gear. Electromechanical valve actuator (EMVA) is one of the latest developments of variable port timing. It can satisfy the compromise of performance, cost and reliability. So it is a very effective method to realize lower fuel consumption and exhaust emissions. In the world there are many well-known universities and companies, which are developing the electromechanical valve actuator with vast human resource and funds. But whether its structure or control method is not perfect, so it need farther development in the future.

This dissertation investigates it on the basis of a host of reference, and combines the real situation of the subject, which is cooperating with Wuxi Fuel Injection Equipment Research Institute. A comprehensive study pattern, the integration of analysis, simulation, test and manufacturing, is applied to develop electromechanical valve actuator with high performance..

Main works are as following:

1. The mathematical model of electromechanical valve actuator is simulated by the MATLAB/SIMULINK software. According to the study of the system's operational mechanism, the effect of various parameters of electromechanical valve actuator on its operation process is revealed. It can provide reliable parameter and foundation to the mechanism design. The computer-aided simulation has many advantages compare to the test, such as low cost and short development cycle. It not only can reduce test times, resources, but also can discover new laws and phenomena. An electromechanical valve actuator set-up, which used silicon sheet as magnetic conductor was designed firstly based on the simulation result and the development experience of foreign company.

2. The control theory of electromechanical valve actuator is studied firstly on the basis of its mathematical model. Two kinds of control methods are also presented, simulation results show that Feedback-Feedforward Iterative learning control has

more significant potential than the PID control method. The learning control algorithm used in this paper can satisfy the trajectory tracking quickly. It provides a capable theoretical method to solve the soft-landing problem, which is the maximum obstacle for the electromechanical valve actuator's practical development.

3. The electronic control unit for electromechanical valve actuator is designed. The process is carry out by the hardware for driving of solenoid and the software for real time control. The hardware designing of ECU includes the selection of the microcomputer, simulator and sensors, designing of driving circuit, etc. The software designing includes demands of electronic control unit, software structure and function, software module analysis and flow chart.

4. The static state measuring system and the dynamic state measuring system are developed firstly for electromechanical valve actuator. By the measuring systems, the electromagnetic characteristics and parameters related to operation process of EMVA can be analyzed. Based on the results, modified design of EMVA and its measuring system are put forward. Experimental results demonstrate that the performance of measuring system can realize the static state and dynamic state measurement of electromechanical valve actuator, the EMVA mechanism can meet the requirement of powerful magnetic force, further development are anticipated for the valve's transition time and soft-landing.

Key words: electromechanical valve actuator, simulation, Feedback-Feedforward Iterative learning control, electronic control unit, driving circuit, measuring system.

目　　录

第一章　绪　　论　1

第二章　电磁全可变气门机构的研究和发展现状　5
§2.1　国外可变气门机构的研究现状（有凸轮驱动机构）　5
2.1.1　改变凸轮轴相角的可变气门机构　5
2.1.2　改变凸轮型线的可变气门机构　6
2.1.3　改变联接从动件的可变气门机构　7
§2.2 无凸轮驱动可变气门机构（全可变气门机构）的研究现状　8
2.2.1　电气驱动气门机构　8
2.2.2　电液驱动气门机构（EHVA）　8
2.2.3　电磁驱动气门机构（EMVA）　9
§2.3 电磁全可变气门机构的发展方向　14
2.3.1　电磁全可变气门机构的优越性　14
2.3.2　研究开发电磁全可变气门机构的难点　16
2.3.3　电磁全可变气门机构的控制策略　18
2.3.4　电磁全可变气门机构的发展趋势　19
参考文献（Reference）　20

第三章　电磁全可变气门系统的建模仿真与实用性开发　23
§3.1 系统建模及仿真　23
§3.2 电磁全可变气门（EMVA）的工作过程及工作特性　25
3.2.1 EMVA 的结构和工作过程　25
3.2.2 EMVA 的工作特性　26
§3.3　EMVA 系统的建模　27
3.3.1　机械—子系统的建模　28
3.3.2　电—子系统的建模　30
3.3.3　磁—子系统的建模　31
§3.4　EMVA 系统模型的仿真计算结果与分析　33

3.4.1 MATLAB 建模仿真工具的引入 33
3.4.2 模型仿真的实现 34
3.4.3 工作参数对 EMVA 工作响应过程的影响 35
§3.5 电磁全可变气门（EMVA）的实用性开发 39
3.5.1 磁性材料的选择 40
3.5.2 磁性材料的热处理 41
3.5.3 静铁心与衔铁的结构设计 42
3.5.4 电磁线圈及弹簧的设计 44
3.5.5 储能弹簧的设计 45
3.5.6 整体装配联结件的设计 46
本章小结 47
参考文献（Reference） 48

第四章 电磁全可变气门系统的控制 49
§4.1 控制理论概述 49
§4.2 EMVA 控制系统的难点 50
§4.3 PID 控制 52
4.3.1 非线性数学模型的线性化 52
4.3.2 PID 控制的实现 53
§4.4 迭代学习控制 57
4.4.1 迭代学习控制理论概述 57
4.4.2 迭代学习控制的理论基础 58
4.4.3 迭代学习控制的基本理论及特点 60
4.4.4 反馈－前馈迭代学习控制 63
4.4.5 反馈－前馈迭代学习控制的实现 64
4.4.6 仿真计算结果的分析 66
本章小结 70
参考文献（Reference） 71

第五章 EMVA 控制系统的硬件及软件设计 72
§5.1 EMVA 控制系统概述 72

5.1.1 电控单元（ECU）的现状 72
5.1.2 电控单元（ECU）的发展方向 73
§5.2 EMVA 控制系统的组成 74
§5.3 EMVA 控制系统的硬件设计 75
5.3.1 EMVA 控制系统总体设计 75
5.3.2 电磁全可变气门的功率驱动电路设计 78
5.3.2.1 脉宽调制（PWM）式驱动电路的研制 79
5.3.2.2 功率开关器件的选择 82
5.4 EMVA 控制系统的软件设计 84
5.4.1 软件设计任务及要求 84
5.4.2 软件设计总体方案 84
本章小结 87
参考文献（Reference） 88

第六章 EMVA 试验测试系统的研究与开发 89
§6.1 静态试验测试系统设计 89
6.1.1 静态试验测试系统原理 89
6.1.2 测试系统的设计 90
§6.2 动态试验测试系统设计 94
6.2.1 动态测试系统试验参数的测量 95
6.2.2 动态测试系统测试台架的设计 98
6.2.3 驱动电路的设计 98
§6.3 电磁全可变气门机构的试验及结果分析 99
6.3.1 静吸力特性的试验研究 99
6.3.2 动态电磁特性的试验研究 104
6.3.3 电磁可变气门的设计改进 107
6.3.4 电磁可变气门的软着陆 109
本章小结 110
参考文献（Reference） 111

第七章 全文工作总结与展望 112
1. 本文的主要研究成果 112
2. 本文的创新 113
3. 今后工作的展望 114

攻读博士期间发表的论文 115
致 谢 116

第一章　绪　论

21 世纪世界所面临最严峻的挑战是能源和环境问题，“节约能源，保护环境”已成为世界各国的首要发展战略。近年来我国经济迅速发展，汽车的保有量以每年 15%左右的速度增长，正面临汽车能源需求和环境保护的双重巨大压力。

内燃机是目前热效率最高的热力发动机，广泛应用于国民经济的各个领域和国防部门，它所发出的功率占全世界所有动力装置总功率的 90%[1]，预计在今后相当长的时期内，内燃机因其特有的优点仍将处于不可替代的地位。现在世界上绝大多数活塞式内燃机都采用机械驱动凸轮结构来驱动进排气门，这些传统的配气机构气门的升程、定时和持续期都是固定不变的。这些定值是对发动机各种运行工况下不同要求的折衷，由于它的简单、可靠、相对来说并不昂贵，至今仍在广泛使用。但是，随着不断增长的燃油经济性和降低有害排放物的要求，迫切要求设计出能使发动机尽量减少折衷性能的配气机构。大量建立在凸轮驱动基础上的可变配气机构（variable valve trains）应运而生，它们主要通过凸轮相位改变或转移到另一个凸轮凸角，来部分优化气门的定时、升程、持续时间和其它运动参数。目前进入实用阶段的大都属于此类机构[2]。无凸轮轴气门驱动机构（camless valvetrains）——全可变气门机构，它们由于自身的优点，日益受到人们的重视，尤其是当今电子技术的飞速发展，促进了无凸轮轴气门驱动机构从研究阶段向实用阶段发展。如表 1－1 给出了世界各大汽车公司可变配气机构的采用情况。

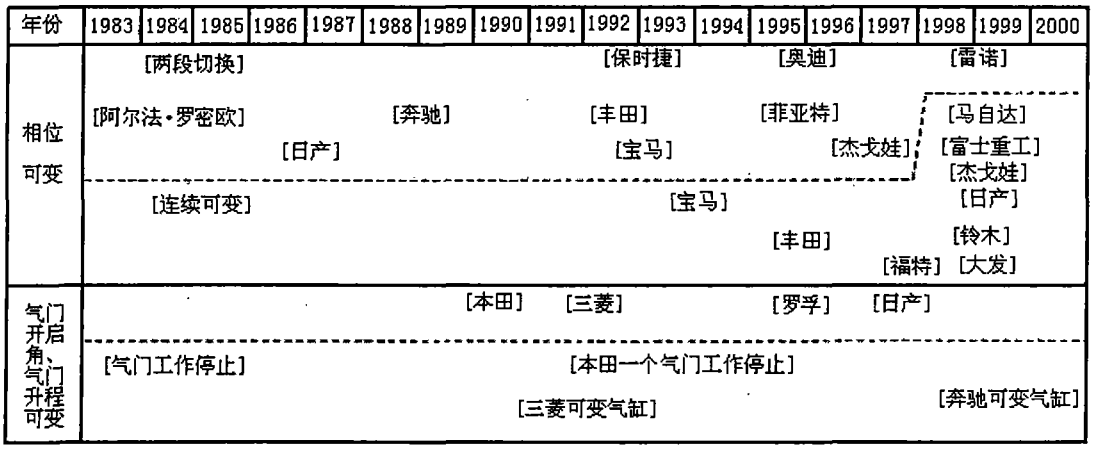


表 1-1　世界各大汽车公司可变配气机构的采用情况[2]

Table 1-1　Application of variable valve trains in the worldwide automobile company

无凸轮轴可变相位机构没有凸轮轴，可以对气门正时的所有因素进行控制，在各种工况下获取最佳气门正时，还能关闭部分气缸的气门，实现可变排量。国外研究无凸轮轴气门驱动机构虽然已经有二十多年，但是还没有可靠的批量生产的产品应用在汽车发动机上。

目前，无凸轮轴气门结构主要有两种方案，电磁控制全可变气门机构（EMVA）和电控液压可变气门机构（ECV）。其中，电控液压可变气门机构是将气门与一个液压活塞相连接，通过电磁阀控制液压缸内高、低压液体的流入和流出来控制气门的运动，美国福特公司的无凸轮电控液压可变配气相位机构是属于该类型的典型机构。[3] 对于利用电磁铁产生的电磁力驱动气门的电磁驱动机构来说，可以实现对进排气门开关时间的单独控制，为减少燃料消耗和降低排放提供最佳方案。目前，德国 FEV 公司开发的电磁控制全可变气门机构已经有产品出现，但由于存在响应速度、气门落座冲击、能耗过高和系统复杂昂贵等问题，仍在进一步改进之中。[4]

电磁气门机构—由微处理器控制的无凸轮轴的全可变气门机构，可以根据变化的工况来不断调整气门的运动参数，实现对气门的升程、运动速度和开启持续时间的独立控制，从而能够获得更好的燃油经济性，更高的扭矩和功率，提高怠速稳定性和降低排放。电磁气门机构还具有下列几个突出优点：

（1） 该气门机构能单独灵活地控制进、排气门开启及关闭共四个定时中的任一定时及气门开启延续时间，使发动机每一工况的这些参数都符合最佳性能要求。

（2） 电磁气门驱动极大地简化了发动机的结构，取消了传统气门机构中的凸轮轴、挺柱、摇臂、液压间隙调节器等驱动件,降低了材料消耗和制造成本；尽管采用电液、电气气门驱动也可以取消凸轮轴等驱动件，但需要增加产生高液、气压的装置以及蓄压器和密封元件等，增加发动机的复杂性从而降低了发动机工作的可靠性。

（3） 利用电磁力驱动发动机气门，可以全部采用电子元器件进行控制，有利于能量的快速输入，提高系统的动态响应速度。

（4） 气门可以不必布置在与凸轮轴中心线垂直的平面上，而是根据燃烧室的型式来布置，气门布置的灵活性甚至可能设计出新的更有利于发动机工作的燃烧室型式。

电磁气门驱动的车辆的燃油消耗要比传统凸轮驱动气门车辆减少 15%，并且可以满足欧 IV 排放标准。[5]

由于电磁全可变气门机构具有上述众多的优越性，国外许多著名大学和公司都投入了大量的人力物力进行EMVA的研究和开发[6, 7, 8]。但到目前为止，无论是结构还是控制方面的技术都不够成熟，还需要进一步的发展完善。而我国在这方面的研究尚属起步阶段，80年代末大连工学院的张育华等人进行过极为简单的探索性研究工作[9]，目前只有清华大学等少数几所高校对EMVA进行了研究，所做的工作也还都处于原理性试验检测阶段，离实用还有很大的差距[10]，因此现阶段我们只能借鉴国外的设计开发经验，通过自行研究和开发来掌握EMVA的工作特性、设计方法与控制策略，为研制出高性能、实用可靠的电磁全可变气门机构打下坚实的基础。

同发达国家相比，国内在电磁可变气门机构的理论和实验研究方面存在着明显的差距，主要是控制模型相对简单，制作技术比较粗糙，检测设备不足以及资金投入量有限等问题。本研究是在大量阅读国内外有关文献资料的基础上，结合电磁可变气门机构课题的实际情况以广泛深入的理论研究为突破，同时结合实验研究是本论文研究的重要途径和手段。

本文将进行以下几个方面的研究工作：

（1） 根据国内现有技术条件对电磁气门仿真系统的可行性和实用性进行分析论证，并设计总体方案，建立电磁气门驱动系统的数学模型，使用 MATLAB 软件进行仿真计算，选择合适的控制策略；

（2） 对 ECU 实时仿真系统的硬件系统进行研究，设计开发其各组成模块；编写控制软件，结合 ECU 的物理层设计，选择合适的单片机和仿真器，进行 ECU 的控制功能仿真，并在此基础上进行硬件设计及组装；

（3） 进行系统集成与调试，调整有关参数进行台架实验，对电磁气门实时仿真系统进行对比校验，为进一步研究电磁全可变气门机构提供依据。

第二章 电磁全可变气门机构的研究和发展现状

通常，发动机配气相位的选取是通过多种不同的配气相位试验，从中选出兼顾发动机各种工况下性能的折衷方案，其结果是发动机性能潜力不能得到充分发挥。随着轿车汽油机的高速化和废气排放法规的日趋严格，配气相位固定不变的缺点就变得越来越突出。因此，可变配气相位机构的研究和生产在世界范围内引起了科研部门和生产厂家的高度重视。

由于可变配气相位技术的优越性，在美国已有 800 多项专利产品[11]。但是出现在 80 年代以前的很多机构存在问题较多，如造价昂贵、机构复杂、可调自由度有限以及冲击速度较高等。近 10 多年，电子技术的发展促进了可变配气相位机构产品化，有些技术已在轿车上使用，取得了较好的效果。

可变配气相位技术包括有凸轮驱动机构和无凸轮驱动机构两大类，其中有凸轮驱动机构主要通过对凸轮轴传动、摇臂比、顶柱或正时皮带的调节达到改变气门正时或升程的目的，多为机械控制，也有少量为电子控制。由于保留了凸轮，其调节能力仍受到原凸轮型线的限制。而无凸轮驱动机构取消了传统发动机气门机构中的凸轮轴及其从动件，以电磁、电液、电气或其他方式直接驱动气门，由于系统调节不受凸轮型线的制约，气门参数调节相当灵活，因此是到目前为止最有潜力的、自由度最大的可变气门系统。

§2.1 国外可变气门机构的研究现状（有凸轮驱动机构）

2.1.1 改变凸轮轴相位角的可变气门机构

这是可变气门机构在实现产品化过程中的第一个阶段，该类机构利用凸轮轴调相原理，凸轮型线是固定的，而凸轮轴相对曲轴的转角是可变的。因为配气相位中影响发动机性能较大的是进气门关闭角和进排气重叠角，在多气门双顶置凸轮轴发动机上，单独控制进、排气凸轮轴，可以实现对这两个因素的控制，改善发动机性能。这类机构原理简单，只用一套额外的机构来改变凸轮轴相角，对原机改动较小，应用较为广泛，缺点是不能改变气门升程和持续期。属于这种原理的机构很多．大多是液压式的。[12, 13, 14]

如图 2－1 所示，BMW 的 VANOS 系统就是一种将液压和机械控制装置结合在一起的凸轮驱动机构，VANOS 系统通过调整机械装置来改变凸轮轴相对于曲轴的位置。[15]

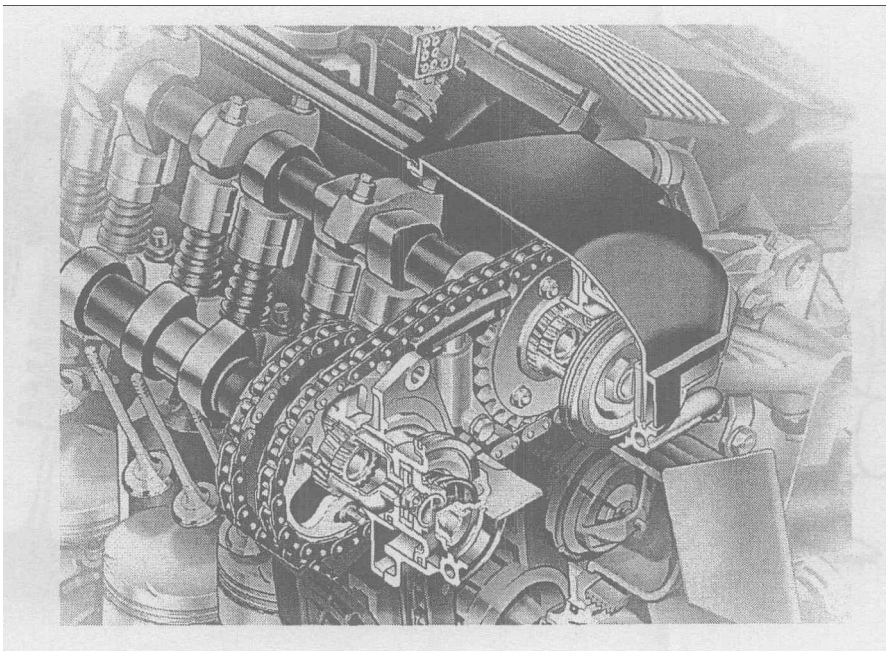


图 2－1　　BMW 的 VANOS 凸轮机构图[15]

Figure 2－1　　VANOS camshaft mechanism of BMW company

2.1.2　改变凸轮型线的可变气门机构

这是可变气门机构在实现产品化过程中的第二个阶段，该类机构可以提供两种以上经过优化的凸轮型线，通过采用不同的凸轮型线驱动气门，得到在不同转速和负荷下更好的性能。本田公司的 VTEC 机构、Mitsubishi 公司的 MIVEC 机构[16]，Fiat 三维凸轮机构、Elrod 和 Nelson 可变凸轮相位机构[17]、Porsche 公司的可变气门机构[18]都属于此类机构类型。

如图 2－2 所示，日本本田公司在 VTEC—E 型[19]可变配气相位机构基础上，开发出三段式 VTEC 可变配气相位机构[20]，该机构使发动机根据自身转速和负荷自动改变气门的配气相位及气门升程，改变进气量。低速时，VTEC 开启一个气门实现稀燃；中速时，采用中速凸轮型线驱动两个进气门，确保中速扭矩；高速时，VTEC 加大气门升程及延长开启时间，使进气量增加，以输出更大功率。

Porsche 公司的可变气门机构针对一个气门设计两个挺柱，里面的挺柱和小的凸轮角相接触，外面的挺柱和大的凸轮角相接触。通过液压机构调节两个挺柱中的一个工作，凸轮轴就可以提供两种不同的凸轮型线，从而产生两种不同的气门运动轨迹。

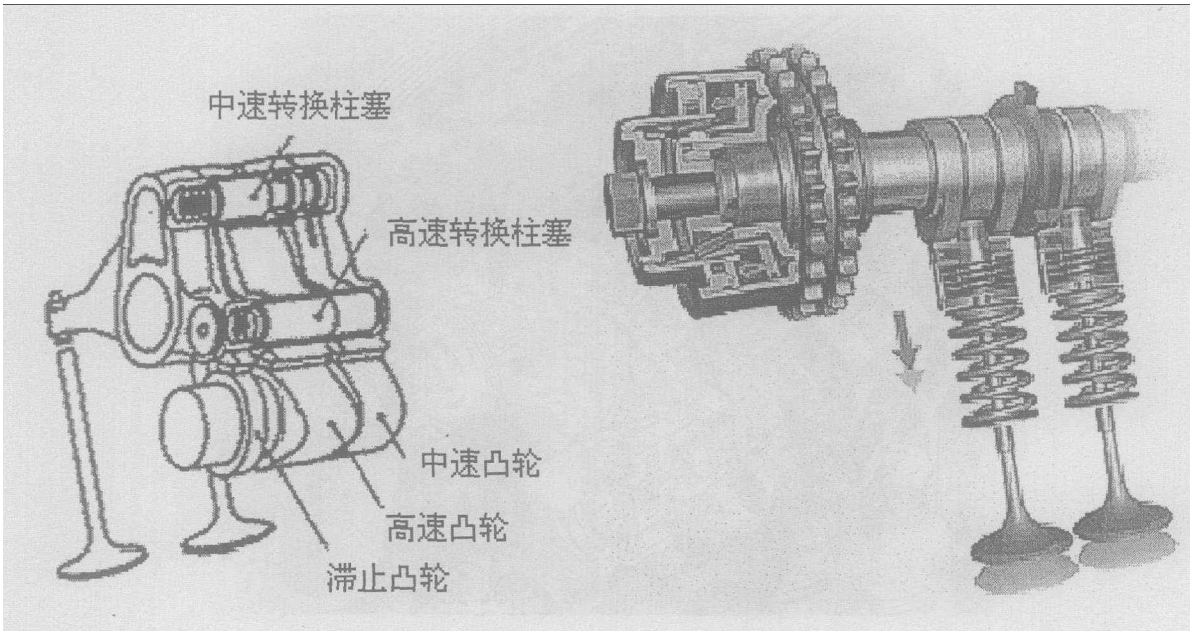


图 2－2　本田 VTEC 可变相位机构图[20]（左）和 Porsche 公司的可变气门机构（右）[18]

Figure 2－2　VTEC variable valve train of Honda company (left)
and variable valve train of Porsche company (right)

2.1.3 改变联接从动件的可变气门机构

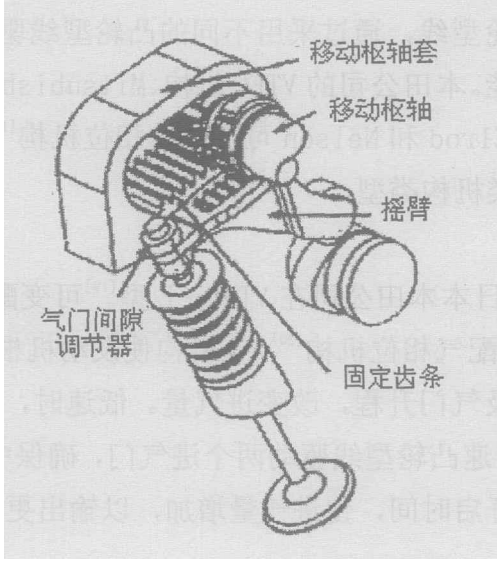


图 2－3　MEC 可变气门机构图[21]

Figure 2－3　Diagram of MEC variable valve train

这是可变气门机构在实现产品化过程中的第三个阶段，即全可变气门机构。该类机构仍然保持凸轮的固有特性，通过改变凸轮与气门之间的联结机构，如挺

柱、摇臂或推杆的结构，间接的实现改变凸轮型线作用。这类机构机械式的较多，也有液压式的．可以较好的实现可变配气相位的功能；不足之处是大多数机构从动件比较多，气门系统存在冲击，有的结构也很复杂。

MEC 的可变配气相位机构[21]就是属于该类型的一种典型机构。如图 2－3 所示，该机构采用一个结构简单可移动摇臂支点，当移动枢轴相对固定齿条移动时，摇臂支点将发生变化。摇臂比相应改变，从而使气门升程、持续时间或相角改变。目前，这种机构尚处于台架研究阶段，但该机构成功的通过了 200h 连续测试。可以控制气门升程由零变化到最大行程，有效持续期从 0° ～260°，是一种较为实用的机构。

§2.2　无凸轮驱动可变气门机构（全可变气门机构）的研究现状

以上所述的系统仍然是建立在传统凸轮驱动机构基础上的可变气门机构，它们仅仅是对原有系统的凸轮和凸轮轴进行了一些改变，因而在结构方面存在许多局限性。而无凸轮驱动气门机构属于全可变配气相位机构，可以对气门定时和升程进行自由灵活地控制，从而优化配气定时，减少发动机泵气损失，加快进气速度，改善混合气质量，改善燃烧过程和降低排放。但是目前这种可变气门机构比传统的凸轮机构需要消耗更多的能量和占用更大的体积，因此需要进行进一步的优化设计。无凸轮驱动气门机构主要包括以下三种类型：电气驱动、电液驱动和电磁驱动可变气门机构。

2.2.1　电气驱动气门机构

Gould[22] 等人介绍了一种电气驱动装置，它将压缩空气作为驱动介质，通过电子—机械阀门进行控制。压缩空气是一种轻质量的介质，可在较宽温度范围内能够进行快速响应。但是，由于需要大量的压缩空气，电气驱动机构比电液、电磁驱动机构要消耗更多的能量。

2.2.2　电液驱动气门机构（EHVA）

EHVA 机构是将气门与一个液压活塞相连接，通过电磁阀控制液压缸内高、低压液体的流入和流出来控制气门的运动。该类机构最早可以追溯到七十年代 Seilly[23]等人设计的一种初级的快速响应螺线阀。现在大多数的电液驱动气门机构[24,25,26]利用液压流体的弹性特征，使其像液体弹簧一样在气门开启和关闭时对

气门进行加速或减速。也就是由流体的势能转换到动能，然后再转回到势能，其中只有很小的能量损失。

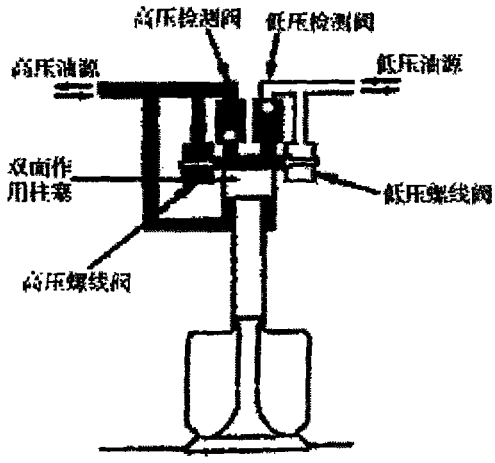


图 2－4 无凸轮电控液压可变气门机构[27]

Figure 2－4 Electrohydraulic valve actuator of Ford company

福特公司研制的无凸轮电控液压气门机构[27]是属于该类型的典型机构，如图2－4所示，它包括高压、低压储能器，并在气门顶部安装一个双面作用的柱塞，柱塞上部可以与高压油源和低压油源相连，下部与高压油源相连。柱塞上部的承压面远远大于下部承压面。当气门开启时，高压螺线阀是打开的，双面柱塞上的净压使气门加速向下运动，当高压螺线阀关闭时，柱塞上的压力下降，在减速的同时，推动柱塞下部的高压油流到高压储能器，低压油流经低压检测阀进入柱塞上部空间。当气门停止向下运动时，低压检测阀关闭，气门在打开的位置锁住。气门关闭的过程与开启相类似，低压螺线阀打开，柱塞上部压力降低至低压储能器内的压力，净压力作用双面柱塞下部使其加速上行。然后，低压螺线阀关闭，柱塞上部压力增加，柱塞减速的同时，推动上部液压油通过高压检测阀流回高压储能器。

2.2.3 电磁驱动气门机构（EMVA）

EMVA 的结构形式由最初的无弹簧式及后来的单弹簧式发展到了目前的双弹簧式。

2.2.3.1 无弹簧的电磁气门机构

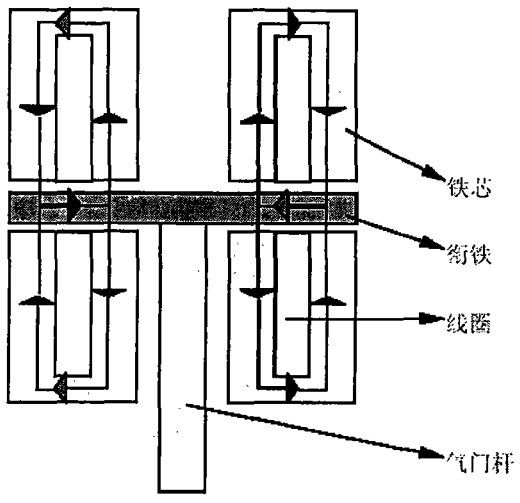


图 2－5　无弹簧 EMVA 结构简图[28]

Figure 2－5　Structure diagram of EMVA without spring

这类机构是最早的EMVA装置，它没有用作储存能量之用的弹簧，其原理图如图2－5所示[28]。上下是两个相对放置的电磁铁，中间是连接发动机气门的作往复运动的衔铁。上下电磁铁线圈交替通电和断电，使得衔铁上下运动，从而实现气门的开启和关闭。

无弹簧EMVA结构简单，同时取消了发动机凸轮轴及其从动件，简化了发动机结构，能独立灵活控制发动机气门正时和气门开启延续时间。但是存在着严重的缺陷：气门关闭时，气门以很大速度直接撞击气缸盖，导致运动不可靠同时产生很大的噪声，能耗过大和响应速度慢等。因而现在很少有人对它进行研究了。

2.2.3.2　单弹簧的电磁气门机构

这类机构由一个电磁铁、一个储能弹簧以及衔铁和气门组成。工作原理如图2－6所示[29,30]，发动机不工作时气门在弹簧作用下处于关闭状态，当气门要开启时，向电磁铁线圈通较大电流，使所产生的电磁力克服弹簧力以打开气门。然后向电磁铁线圈通较小电流，使气门保持全开状态。电磁铁线圈断电时，气门在弹簧力作用下关闭并保持。

单弹簧EMVA存在的缺点是：不能实现气门的软着陆，同时存在响应速度慢和能耗过大等缺陷。 因而也不是研究的主流方向。

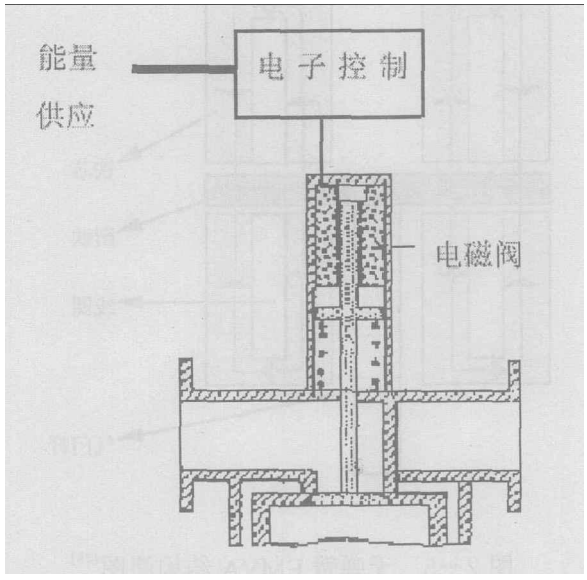


图2－6　单弹簧EMVA结构简图[29, 30]

Figure 2－6　Structure diagram of EMVA with one spring

2.2.3.3　双弹簧的电磁气门机构

双弹簧 EMVA 自 1975 年 Longstaff Kenneth 和 Holemess Stanley[31]提出后，经过不断的研究和发展，目前在国外已经较为成熟，并且已经开始装车试用[32]，典型双弹簧 EMVA 的结构和工作原理如图 2－7 所示：

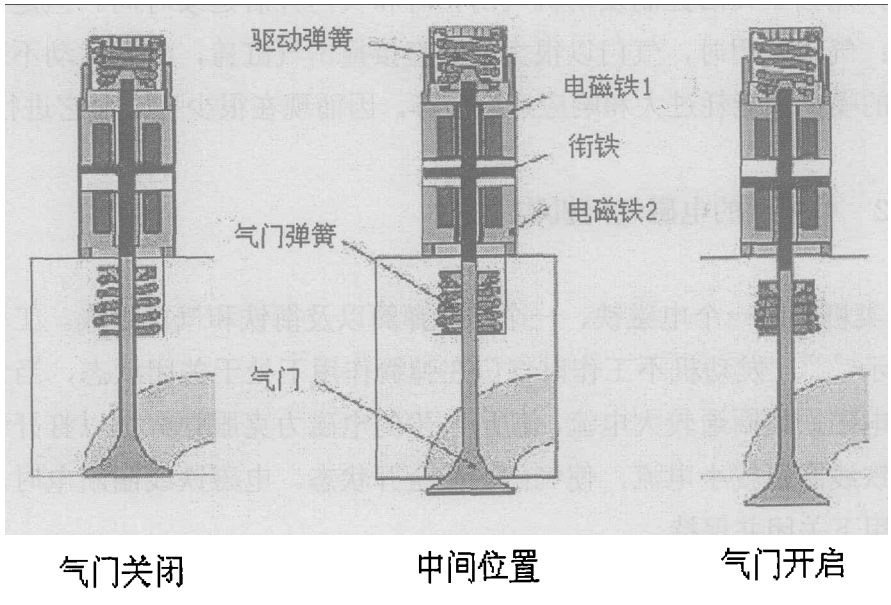
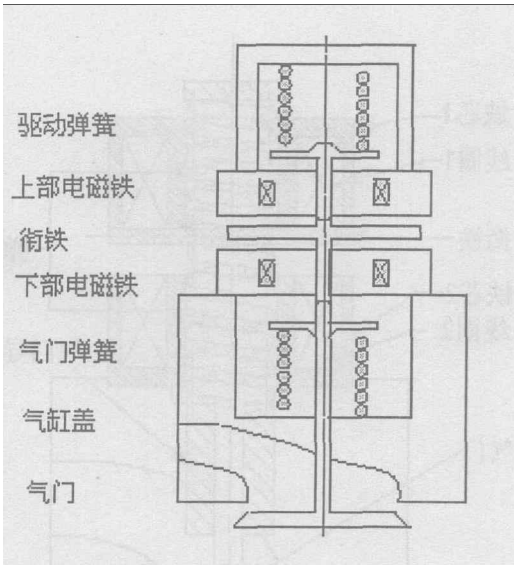


图 2－7　双弹簧 EMVA 系统结构图[33]

Figure 2－7　Structure diagram of EMVA with double spring

电磁气门主要工作在三个典型的位置上，驱动器的设计是建立在电磁理论的基础上的，驱动机构由两个电磁铁、两个弹簧以及一个衔铁组成，衔铁在上下两个电磁铁之间运动。电磁铁的线圈绕在铁磁材料上。当线圈通电时，产生电磁场，并且将电磁力施加到衔铁上。当发动机不工作时，也就是没有电磁力存在时，衔铁通过上下两个弹簧的作用保持在两个电磁铁之间的中间位置，这时气门相应处于半开状态；当发动机启动时，电磁铁 1 的线圈通电，衔铁和电磁铁 1 接触，气门处于关闭状态；当气门打开时，电磁铁 1 的线圈断电，衔铁在弹簧力的作用下运动到电磁铁 2，通过给电磁铁 2 的线圈通电，运动中损失的能量得以补充，并且使气门保持在开启状态。为了关闭气门，电磁铁 2 断电并且重新给电磁铁 1 通电，如此周而复始。

该类机构利用弹簧作为储能元件，可以大大降低系统能量消耗（因为在无阻尼理想情况下，可以仅靠弹簧储存的能量就能完成过渡过程），并且可以利用电磁力和弹簧反力的配合特性，使得气门落座速度降到很低，从而实现气门的软着陆。因此目前世界上为数众多的公司都在进行双弹簧 EMVA 的研究，其中在技术上较为成熟的机构有德国的 FEV 公司[33]、美国的福特汽车公司[34]、Aura Systems 公司[35]、通用汽车公司[36]等，它们的结构简图分别如图 2－7、图 2－8、图 2－9、图 2－10 所示。



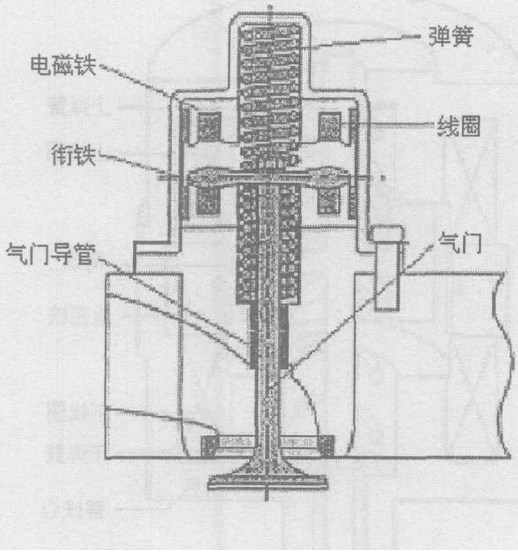


图2－8　福特公司EMVA机构简图[34]　　图2－9　Aura Systems公司[35]EMVA机构简图

Figure 2－8　EMVA structure diagram of Ford company

Figure 2－9　EMVA Structure diagram of Aura Systems company

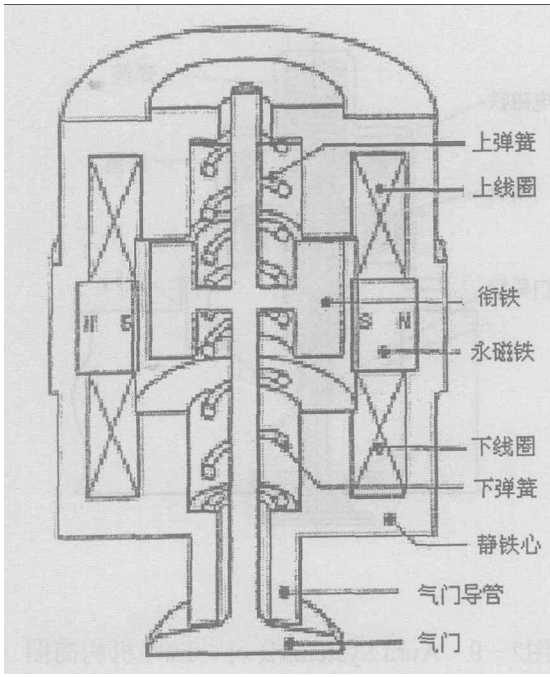
FEV 公司的电磁气门驱动机构的特点是双弹簧分别放在上下静铁芯的上面

和下面，静铁芯外型近似为长方体，衔铁形状为长方形，并装有液力间隙调节器。在每个发动机循环中，每个气门启闭所消耗的电能约为 1 焦耳，这个能量的消耗取决于气门的大小、发动机效率等设计参数。气门的开启持续时间、气门正时和落座速度可以根据发动机的转速和负荷自由选择。

福特公司的 EMVA 结构与 FEV 公司的相类似。其气门升程为 8mm，在转速为 2500r/min，压力为 5.5bar 时，气门开启(或关闭)时间约为 4ms，闭环控制下的落座速度约为 0.5m/s。

Aura Systems 公司的 EMVA 特点是双弹簧放置在静铁芯的中间，静铁芯外形为柱状，衔铁为圆盘形。该机构在转速为 10000r/min 的每缸四气门汽油机上运行时，气门过渡过程时间为 2.42～3ms，气门落座速度为 0.1m/s。

通用汽车公司 EMVA 机构的特点是有一个永磁体位于两个电磁铁中间，利用永磁铁产生的电磁力克服弹簧力使气门保持在极限位置。在一个二气门单缸机上运行时，发动机的转速为 1500r/min，气门升程为 8mm，弹簧刚度为 50N/mm，气门落座速度在开环控制下最低可达到 0.35m/s，最短过渡过程时间为 7.3ms。



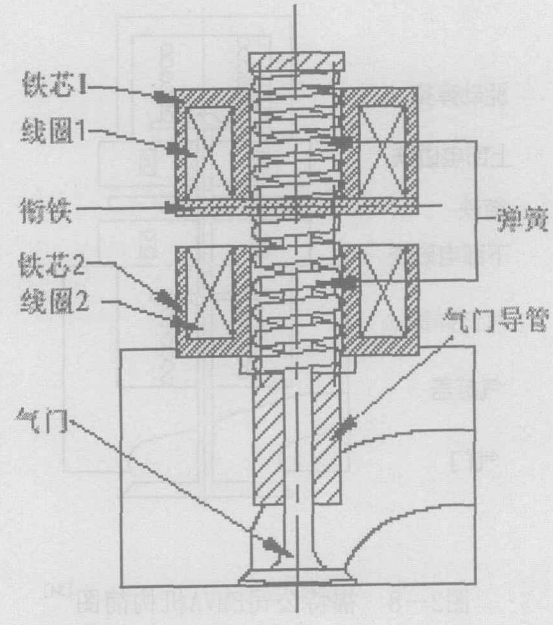


图 2－10 通用汽车公司[36] EMVA 机构简图　　图 2－11 清华大学[37] EMVA 机构简图

Figure 2－10 EMVA structure diagram of GM company

Figure 2－11 EMVA Structure diagram of Qinghua University

在国内，目前仅有清华大学等极少数高校在对EMVA进行探索性的试验研究。其中，清华大学设计制作的EMVA装置如图2－11所示，其静铁心外形为柱状，衔铁为圆盘形，双弹簧放置在静铁心中间。他们目前已经进行了电磁铁静吸力特性的试验研究[37]和设计了电磁气门的开环控制系统[38]。

§2.3　电磁全可变气门机构的发展方向

2.3.1　电磁全可变气门机构的优越性

电磁全可变气门机构由于气门正时、升程和开启持续时间均可自由改变，可控制自由度最多，实现的功能最为广泛，是可变气门机构中比较理想的机构。下面根据其对发动机性能方面的影响，阐述它的主要优点。

1）　提高充气效率

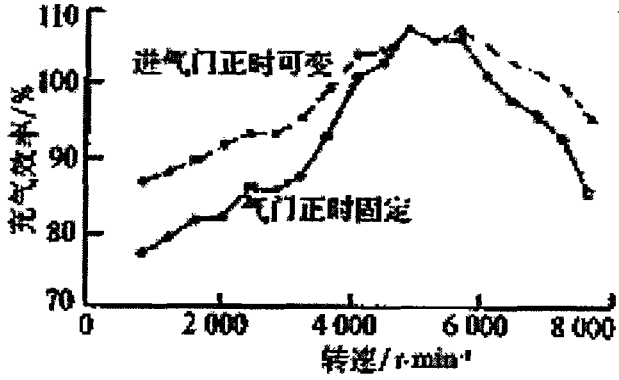


图2－12　全负荷时充气效率对比[39]

Figure 2－12　Comparison of full load volumetric efficiency

传统配气机构气门升程的开启和关闭是一个渐进的过程，受凸轮型线和配气机构几何尺寸的限制，其流通截面较小，直接影响充气效率。与此相比，电磁驱动可变气门的运动是可以控制的，开启和关闭气门的时间只占气门开启持续期的一小部分。气门升程随曲轴转角的变化接近一梯形。这种进气气门开启历程，使气门保持最大升程时间占整个开启时间的大部分，保证了较高的充气效率，有利于提高发动机的动力性、经济性以及排放的改善。而且电磁驱动可变气门从控制理论上可以实现随发动机工况全程控制，使气门升程和定时始终处在与工况要求最佳匹配的状况。如图2－12所示为采用进气门可变正时与气门正时不变时充气

效率随转速变化的对比[39]。

2）减少泵气损失

泵气损失是进气和排气冲程中活塞克服气体阻力所作的负功。部分负荷时，传统的配气机构中因气门所引起的节流作用，导致较大的泵气损失是难于避免的。而电磁可变气门，由于其气门升程和开启持续时间随发动机工况可变，可以使气门所引起的节流损失降低到最小程度，从而大大降低了泵气损失，特别在低负荷区。文献[40]指出，无节流作用情况下的泵损失要比有节流作用情况下的泵损失减少约 80%。

3）降低燃油消耗

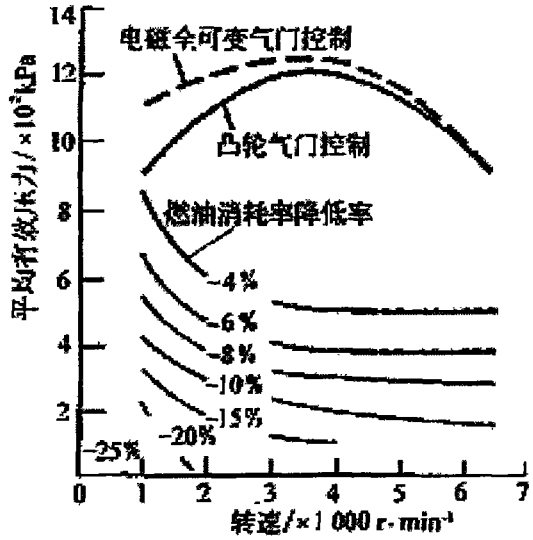


图 2－13 电磁气门控制燃油消耗的降低[41]

Figure 2－13 Comparison of fuel consumption

对于传统的电控喷射发动机，节气门带来很大的节流损失是它的致命弱点。美国联邦试验规程——75 循环中，高达 80%的燃油消耗出现在低负荷区[41]。采用电磁全可变气门机构，可以代替节气门来控制发动机负荷，降低泵气损失，从而改善燃油经济性。其中，Aura 公司的 EMVA 机构可使发动机油耗降低 7～10%，功率增加 14～16%，扭矩增加 16%[35]。FEV 公司的 EMVA 机构通过在低速时增加进气流速，可以对气缸内混合气组分进行优化，与单点喷射发动机相比，燃油消耗降低 13%—17%，如图 2－13 所示[41]。

4）停滞气门及改善排放

由于汽车发动机大部分时间工作在部分负荷下，若采用电磁可变气门，可以关闭部分气缸的进排气门，并停止燃油供给，实现发动机可变排量，可以在不影响汽车动力性的情况下提高发动机负荷率，改善其经济性[34]。

由于电磁可变气门可以实现对不同工况的全过程控制，因而可以控制气缸内的残余废气系数，实现内部 EGR，从而降低排放，Aura 公司的 EMVA 机构可使 HC、CO 和 NO_X 排放分别降低 34～37%、33%和 50%[35]。FEV 公司的 EMVA 机构在启动和怠速时 HC 排放比传统发动机减少 50%，冷启动时 CO 排放甚至比 EUIV（欧洲 4）标准还低 50%、NO_X 排放可减少 40～60%[42]。因而采用电磁可变气门和相应的控制系统其优越性是十分明显的。

2.3.2　研究开发电磁全可变气门机构的难点

电磁全可变气门机构能够更加自由、灵活地控制进、排气门，因此可以更好地改善发动机性能。但是，EMVA 机构更多的灵活性决定了开发过程中面临更多的复杂性和更大的挑战。

首先，研究开发 EMVA 机构的一个难点是很难获得该领域的参考资料。由于至今为止，国内外的 EMVA 机构都还处在研究开发阶段，因此都在技术上实行保密，从公开发表的文献上仅能得到一些表面的、简要的信息。这就意味着我们的研究工作没有基础，必须一切从零开始，独立研制这一复杂的系统，解决可能出现的各种问题。

尽管 EMVA 机构具有许多优点，但是至今为止，还没有批量生产的产品应用在发动机上。这是因为该类机构的一些难题还没有完全解决，比如系统复杂昂贵、需要供应高电压/大电流、需要消耗较多的能量、响应速度不高以及落座冲击速度过大等。虽然随着计算机软、硬件技术的飞速发展，这些问题正在逐步得到解决，但是这类系统不断增加的复杂性仍然给控制系统的设计和机构的实用化带来许多挑战。

通常，发动机所有可控功能由发动机中央处理实现控制。它通过所有传感器的输入信号来决定输出信号，以管理控制发动机各个子系统。如图 2－14 给出了采用电磁驱动气门机构发动机的控制系统图，由图可以看出，除了已有的传统的子控制系统外，该类发动机控制系统还包括 EMVA 控制单元、驱动装置以及与驱

动装置相关的传感器。EMVA 控制单元包括控制逻辑、电源信号发生器和数据采集电路，控制逻辑根据气门机构传感器和发动机控制系统的信号向驱动装置发出指令。

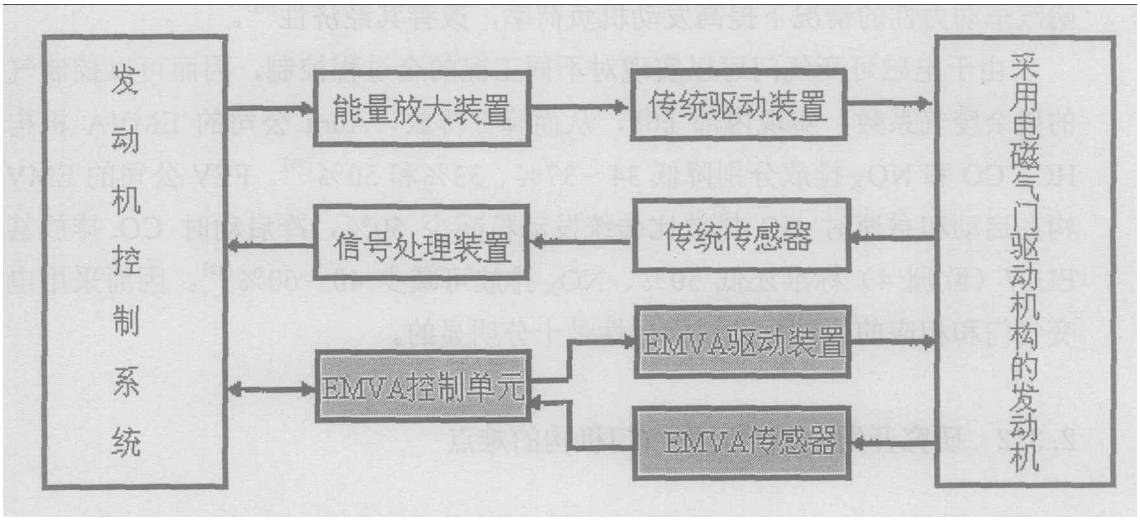


图 2－14　采用电磁气门机构发动机的控制系统图

Figure 2－14　Control system of engine with electromechanical valve train

EMVA 控制系统必须具有传统凸轮驱动气门机构的优点。传统凸轮驱动机构具有结构简单可靠、价格便宜以及很低的落座冲击速度这些优点，它们是通过对凸轮型线的精确仔细设计来实现的。与此相比，目前的 EMVA 机构却具有价格昂贵、可靠性不高、不易布置、噪声和振动等许多问题。其中，噪声问题是该技术所面临的最为严峻的问题，如果不能找到有效的解决方案，它将成为 EMVA 机构走向实用化的最大障碍。而噪声问题很大程度上是由于落座速度过高引起的，因此我们必须尽量将落座速度降到最小，这也就是气门的软着陆问题（当气门以小于 0.1m/s 的速度落座，则称之为软着陆）。但在实际工况下，由于(i) EMVA 系统高度的非线性；(ii)输入控制的磁饱和；(iii)作用于气门的变化的燃气阻力，使得要实现气门软着陆非常困难。

另外，系统的响应速度不高也是研究 EMVA 机构所面临的一个难题。静铁心的材料、运动质量的大小和弹簧的刚度对响应速度具有至关重要的影响，因为电磁铁只有产生足够大的电磁作用力才能保证气门快速开启、可靠关闭，这就需要选择磁导率大、矫顽磁力小和电阻率大的软磁材料制作静铁心，在尽量减小体积的同时增大电磁力，提高响应速度。但是国产软磁材料很难满足上述要求，国外软磁材料的磁性能要远远优于国产的，但是由于价格较高，将加大电磁铁的制作

成本，不利于开发。因此我们只有通过合理的结构设计来提高 EMVA 机构的响应速度，结构设计包括衔铁、静铁心的结构设计和弹簧的选择等。

EMVA 机构工作时还需要消耗较高的能量，如何降低能量消耗是这类机构必须解决的问题。除此之外，由于气门的升程、相位、定时都可以变化，该系统的控制部分也比传统发动机更为复杂困难。

2.3.3　电磁全可变气门机构的控制策略

EMVA 系统要精确、实时、可靠地实现各种功能，特别是实现气门软着陆，必须应用相应的控制策略。

EMVA 的控制策略主要是确保气门按照要求动作以及实现气门的软着陆，目前较成熟的控制策略有无传感器控制法[43]、多参数控制法[44]、能量控制法[45]和迭代学习控制法[46]等。

1）无传感器控制法（Sensorless Control Method）

德国 Siemens 公司的 Butzmann 等人于 2000 年提出了这种控制方法，他们通过实验和理论推导，用以下这个简单的模型来对气门进行控制：

$$di/idt = -v/d \qquad (1)$$

其中：i－线圈电流，v－气门运动速度，t－气门运动时间

d－衔铁与铁心之间的气隙长度。

如果假设公式（1）可以保持为常数，那么气门的运动速度v可以随着气隙长度d的减小而减小，从而减小落座速度，实现软着陆，但是这个模型仅在特定情况下是近似有效的。

2）多参数控制法

Chun Tai 等人于 2001 年提出这种控制方法，其基本原理是在建立一个基于面向控制的线性模型的基础上，设计一个包含数学模拟和系统识别的灰箱，将内部稳定反馈控制和外部周期迭代反馈控制结合在一起的控制方法。

3）能量控制法（Energy Control Method）

德国 FEV 公司的 Schmitz 等人提出了这种控制方法来实现气门的软着陆，其基本原理是假设软着陆时衔铁的运动速度为零，此时系统的总能量为弹簧储存的弹性势能，以此能量为基准，将衔铁运动过程中的动能和弹性势能之和与基准能量相比较，得到系统损耗的能量，据此来调整线圈中的电流，向系统补充能量。

4）迭代学习控制法（Iterative Learning Control）

Hoffmann 等人于 2001 年在一台装配电磁气门驱动机构的汽油机上采用这种控制方法对气门的运动进行模拟控制。该控制法通过设计一个跟踪算法来计算气门的位置 y(t)，基于系统模型线性化的基础上来参数化迭代学习算法。气门的理想位置 $y_d(t)$被设计为气门自由运动时的光滑连续曲线。此闭环系统包括一个前馈和一个反馈控制器，其中反馈控制器是一个驱动衔铁运动到理想位置的线性稳定控制器，它的原理是基于衔铁在靠近接触位置的平衡点时的线性化和离散化的基础上设计的。仿真计算表明，在此学习算法的控制下，气门落座速度随着循环的增加而不断下降。

2.3.4 电磁全可变气门机构的发展趋势

EMVA 的发展趋势是使得整个系统的体积更小、能耗更低，能够得到更高的响应速度以及实现气门的软着陆。

EMVA 的精确落座问题及落座冲击的问题虽然可以通过改进 EMVA 的结构得到改善，但要彻底解决，还得需要合适的控制策略[47]。

第三章 电磁全可变气门系统的建模仿真与实用性开发

本章的主要工作：

分析电磁全可变气门系统的数学模型，利用 MATLAB 软件进行仿真计算，通过研究电磁气门系统的工作机理，揭示电磁气门各种工作参数对其工作过程的影响规律，从而对电磁气门的设计制作提供可靠的参数和依据。然后根据仿真计算结果和国外的研究经验，自行研制开发了一套电磁可变气门机构。

§3.1 系统建模及仿真

研究一个系统的目的是为了了解系统各个组成部分之间的关系，或者是为了预示系统在一种新的工作策略下的执行情况。由于许多系统不具有预先实验的可能性，这时就需按实际系统建立模型（物理模型或数学模型）进行研究，然后利用模型仿真或实验研究的结果来推断实际系统的工作。

模型就是把关于过程的本质部分信息减缩成有用的描述形式。它是用来描述过程的运动规律，是过程的一种客观写照或缩影，是分析过程和预报、控制过程行为特性的有力工具。对实际系统来说，模型一般不可能考虑过程的所有因素。从这个意义上说，所谓模型可以说是按照过程模型的目的所作的一种近似描述。建立实际过程的模型时，存在着精确性和复杂性这一对矛盾，找出这两者的折衷解决办法是建立实际过程模型的关键。

模型的分类方法很多，可以根据模型的表示方式简单地将模型分为物理模型和数学模型。物理模型也称实体模型，是实际系统在尺寸上缩小或放大后的相似体，其外观与实际系统极为相似，描述的逼真感较强。数学模型是用数学方程（通常是一些代数方程和微分方程的组合）来描述系统的结构和性能的模型。按照所描述的过程特性，数学模型又可分为线性与非线性、动态与静态、确定性与随机性、宏观与微观、连续与离散、定常与时变、集中参数与分布参数等类型。

系统建模的方法包括以下两种：

（1）机理建模

先作出某些假设，再根据过程本身的内在机理，运用能量平衡、质量平衡、动力学原理等建立系统的模型。

（2）统计建模

根据被控过程的输入、输出数据，用最小二乘法、极大似然估计法等系统辨

识方法来建立数学模型。

仿真技术是在工程实现前基于相似原理（数学相似、几何相似）、信息技术、系统技术及其应用领域有关的专业技术，以计算机和各种物理效应设备为工具，利用数学模型或物理模型代替实际系统进行实验研究的一门边缘学科。

物理仿真是仿真技术的一个分支，它的特点是真实地制造出了一个与研究对象有着相同物理特性的模型实物，模型的几何尺寸与对象实物完全成比例，且在相同比例的环境条件下发生与对象实物完全相同的物理过程。这对于研究过于复杂或目前机理尚未完全清楚的系统是比较有利的，但必须造出实物模型及相应的测试环境，过程缓慢，代价昂贵。

随着计算机技术的发展，仿真技术的另一分支—数学仿真开始得到越来越多的应用。所谓数学仿真[48]，即针对研究对象或系统，根据其运动规律、约束条件和物理特性抽象出数学模型，然后确定算法建立仿真模型，最后再通过编制程序由计算机求解出系统的动态模型性能。其基本要素和相互间的联系如图 3－1 所示。

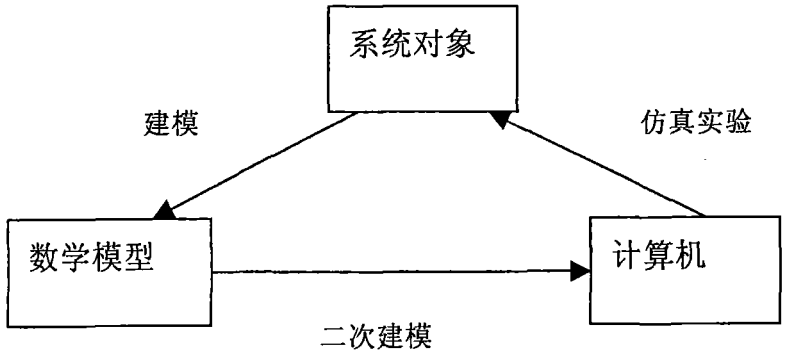


图 3－1　数学仿真结构组成

Figure 3－1 Structure of mathematical Simulation

数学仿真的优点是应用范围广，在算法软件允许的条件下，可以对动态特性截然不同的各种动态系统进行仿真研究，进行一次仿真研究的主要工作是建立模型和编制程序，而无需花费大量投资去进行实物操作，可以节约大量时间和费用，用于优化设计时效率高、效果好，要比物理仿真有更大的优越性。

要进行数学仿真必须首先得到研究对象的数学模型，模型的正确性与合理性将直接决定仿真能否反映系统特性和能否真正实现，因此建模是仿真过程中最重要的环节，建模应遵循下列原则：[49]

1）　模型的精度与研究目的息息相关，而测试数据的精确度、建模的方法、模型的结构和算法的选用等都会对模型的精度造成影响，因此应从工程的实

际要求出发，确定合适的模型精度要求；

2） 建模是为了实现对实际系统的分析研究，因此应预先提出模型的适用条件，恰当地选择模型的描述变量，以保证模型的合理性和实用性；

3） 在满足模型精度的前提下，应尽可能通过降低阶数、简化结构等方式进行必要的简化，降低模型的复杂程度；

4） 应保证模型具有良好的鲁棒性，以利于实现仿真结果的外推。

建立数学模型后要进行仿真，就必须考虑算法的选择。由于数学模型往往是采用一系列的微分方程、代数方程等表达式来描述系统，要进行计算机仿真，首先要选择合适的算法。目前常用的算法可归结为以下两大类：[50]

1） 基于常微分方程数值解的方法，如龙格—库塔法、亚当姆斯—贝希霍斯法、吉尔法等；

2） 基于连续系统离散化的方法，如转移矩阵法、离散相似法、屠斯丁法等。

其中较为常用的有欧拉法、四阶龙格—库塔法、屠斯丁法和离散相似法，表3－1列出了这四种算法特点的比较，可供对具有不同要求的仿真过程进行针对性的选用。

表3－1　四种常用算法的比较

Table 3－1　Comparison of four usual algorithm

	欧拉法	四阶龙格－库塔法	屠斯丁法	离散相似法
模型描述	微分方程	微分方程	传递函数	状态方程
适用系统	非线性系统	非线性系统	线性系统	线性系统
计算速度	最快	慢	快	较快
计算精度	低，甚至不稳定	低	高	高

§3.2　电磁全可变气门（EMVA）的工作过程及工作特性

3.2.1　EMVA的工作过程

为了建立电磁全可变气门的仿真模型，必须对其工作过程有所了解。如第二章图2－7所示，双弹簧电磁全可变气门包括对称的上、下两个电磁铁，上电磁铁通电时关闭气门，下电磁铁通电时打开气门。对称的上、下两个弹簧通过弹簧座压住衔铁和气门。当任意一个线圈通电时，产生的电磁力驱动衔铁上下运动，当两个线圈都断电时，衔铁则正好处于上下两个电磁铁的中间位置，这时上下两个

弹簧都处于同样的压缩状态。它的具体工作过程如图 3－2 所示[51]，可以划分为以下四个阶段：

1）闭合状态

电控单元（ECU）发出控制脉冲给上部电磁铁的驱动模块，驱动模块提供低的维持电压，使得上部电磁铁线圈产生的电磁力能够克服弹簧力让气门保持在关闭位置；同时对下部电磁铁线圈提供零电压。

2）开启过程

驱动模块根据 ECU 的控制脉冲对上部电磁铁的线圈断电，电磁力消失，这时被压缩的弹簧推动衔铁开始运动，接着对下部电磁铁的线圈通以高的峰值驱动电压，使气门完全打开。

3）全开状态

当气门到达开启位置时，驱动模块将下部电磁铁线圈的电压调整为低的维持电压，维持电压的大小对于减少电磁铁的能量消耗来说是非常重要的。

4）关闭过程

与开启过程类似，先对下部电磁铁的线圈断电，然后向上部电磁铁的线圈通以驱动电压，使气门快速落座。

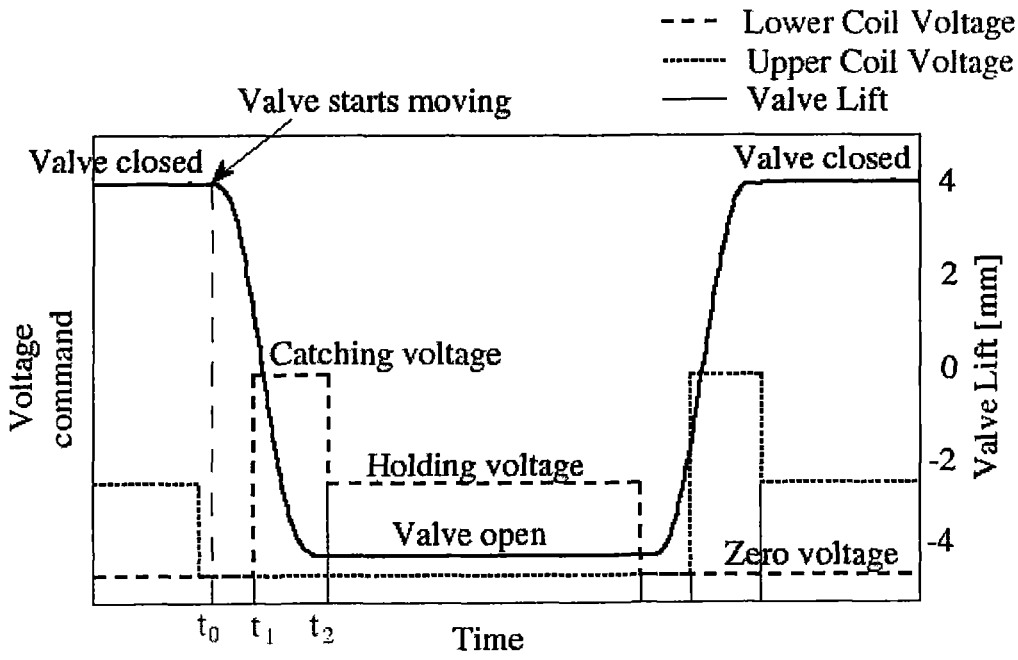


图 3－2　电磁全可变气门的工作过程

Figure 3－2　Working process of Electromechanical Valve Actuator

3.2.2　EMVA 的工作特性

为了保证EMVA系统可靠稳定的工作，它应该具有以下几方面的工作特性：

1） 快速响应性能

EMVA的快速响应性能主要体现在气门的快速开启和关闭上。在排气行程，气门快速启闭有利于排出废气；在进气行程，气门快速启闭可以提高充气效率，有利于增加发动机扭矩。

2） 强电磁作用力特性

EMVA的工作条件很复杂，电磁铁应能够产生足够大的电磁作用力，才能保证系统稳定可靠地工作，这主要是因为：

a. 在初始化阶段，衔铁由中间位置开始运动，这时气隙（一般为4～6mm）很大，完全靠电磁力克服弹簧力使衔铁从平衡位置向极限位置运动，要使衔铁在预定的时间内（一般约为几毫秒）运动这样一段距离，必须要有足够大的电磁力作用在衔铁上。

b. EMVA在工作过程中要受到很多不确定因素的影响（如气缸内气压的波动的影响、衔铁要受到空气阻尼的影响、气门杆要受到摩擦力的作用等），强电磁力能够减小不确定性因素对于机构运动的影响。

c. 强电磁力是确保气门可靠密封的有效手段。气门座面处的密封是气门密封锥面与气门座圈面紧密贴和来保证的，这在很大程度上取决于气门所受的电磁力与各种反力的合力的大小和方向，只有在电磁力足够大的情况下才能保证气门可靠的密封。

3）良好的散热特性[52]

EMVA的电磁线圈始终在通电和断电交替循环的情况下工作，线圈由于本身的电阻损耗要发热，铁磁体在变化的磁场作用下产生涡流和磁滞损耗也要发热，气门运动时的摩擦、撞击以及空气阻尼的影响也会产生一部分热量，所有这些热量的产生都会影响到线圈的温度。如果线圈温度过高，会导致EMVA无法正常工作。此外，磁性材料的磁性能也与温度密切相关；温度过高会导致磁性能的下降。

因此，EMVA应具有良好的散热特性，确保其稳定可靠工作。良好的散热特性也为功率驱动模块输入更高的能量，进而提高EMVA的响应速度提供了可能。

§3.3 EMVA 系统的建模

由于EMVA系统的弹簧力和电磁力在很大程度上决定了气门的运动情况，因此该系统是一个典型的电、磁和机械相耦合的组件，在对其进行建模时，要综合

考虑电、磁和机械这三个子系统之间的相互关系。由于气门的开启和关闭过程是类似的两个过程，所以可以先研究气门的开启过程，如图3－3给出了气门开启过程中仅对下部电磁铁通电时三个子系统之间的相互关系（气门关闭过程中对上部电磁铁通电时的相互关系与此相同）。

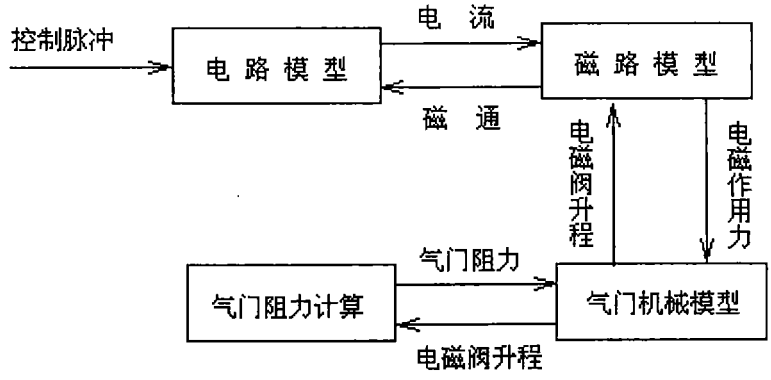


图 3－3　EMVA 各子系统之间的相互关系

Figure 3－3　Interaction of EMVA subsystems

3.3.1　机械一子系统的建模

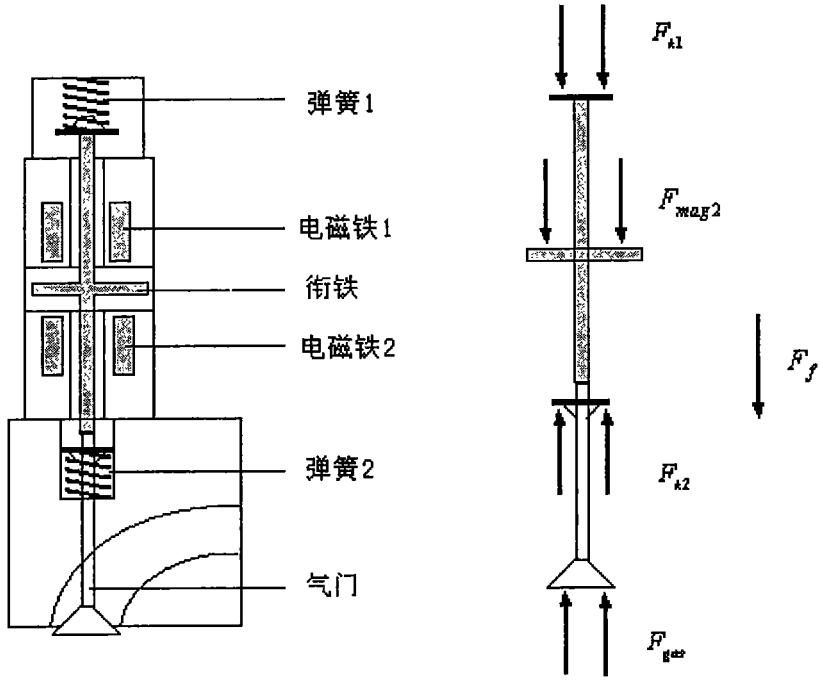


图 3－4　　EMVA 的机械子系统

Figure 3－4　Mechanical subsystem of the EMVA

EMVA 的机械子系统和受力分析如图 3－4 所示，假设向上为正方向。根据牛顿第二定律，该系统的微分方程如下：

$$m\ddot{x} = -F_{mag2} - F_{k1} + F_{k2} + F_{gas} - F_f \qquad (3.1)$$

其中：

m—— EMVA 子系统的运动质量（kg）；

x —— 衔铁距离电磁铁 2 的距离（m）；当$x=0$ 时，衔铁与电磁铁 2 接触，气门处于开启位置；当$x=l$时（l为气门最大升程 0.008m），衔铁与电磁铁 1 接触，气门处于关闭位置；

F_{k1}—— 弹簧 1 产生的作用力（N）；

F_{k2}—— 弹簧 2 产生的作用力（N）；

F_f—— 气门由于摩擦产生的阻尼力（N）；

F_{gas}—— 燃气压力和流动阻力（N）

F_{mag2}——电磁铁 2 产生的电磁力；（N）

EMVA 子系统的运动质量m包括：上部弹簧座、下部弹簧座、气门、衔铁及其轴、以及部分弹簧的质量，由于它们是同时动作的，因此可以将它们看作一个整体。弹簧由于刚度很高且质量较大，因此相对其它部分运动质量不可以忽略不计，一般将其 1/3 质量加入运动质量。当衔铁位于中间平衡位置（$x=0.004m$）时，两个弹簧都处于压缩状态。

弹簧力和阻尼力的计算：

$$F_{k1} - F_{k2} = 2kx \qquad (3.2)$$

$$F_f = k_f \dot{x} \qquad (3.3)$$

其中：

k——弹簧的刚度，假设其为线性的，且两个弹簧的刚度是相同的（N/m）；

k_f——阻尼系数（$N/(m/s)$），这里参考文献[53]的经验数据，

取$k_f=3.5N/(m/s)$。

燃气压力和流动阻力F_{gas}是一个不确定的扰动力，当发动机高速运转时，排气门所受到的该力较大。本研究由于是将 EMVA 机构安装在模拟气缸盖上，没有燃气的流动，因此暂不考虑该力，在实机运行时也可参考文献[53]选取。

如图 3－5 给出了气门在阻尼自由振动和无阻尼自由振动情况下的仿真结果，由图中我们可以看出当弹簧刚度为 90N/mm 时，电磁气门的无阻尼自由振动频率为$f_n=118.9$ Hz；当弹簧刚度为 30N/mm 时，电磁气门的无阻尼自由振动频率为$f_n=76.9$Hz，据此可以避免电磁气门在工作过程中产生共振。

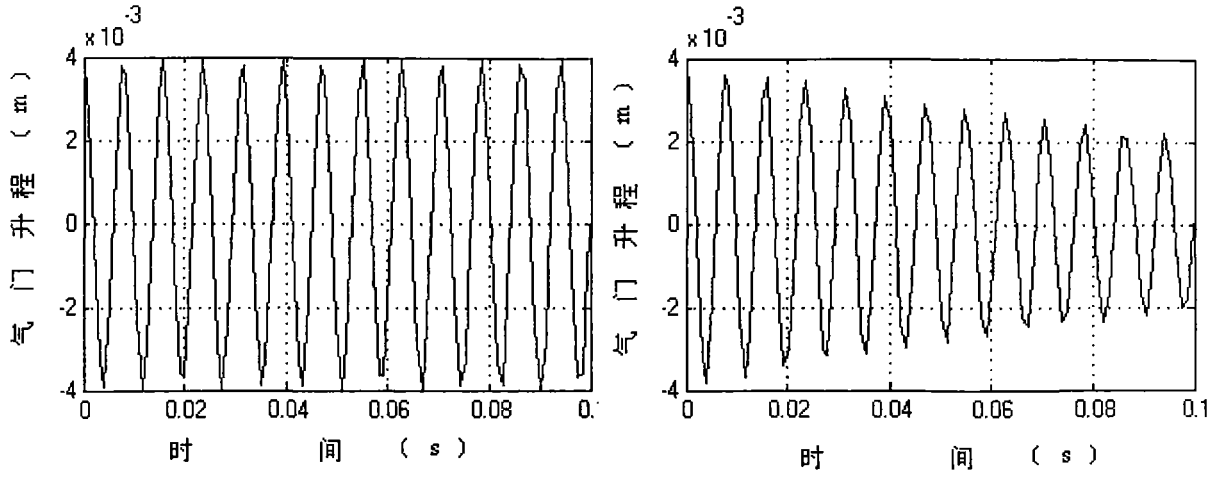


图 3－5a　无阻尼自由振动（左）和阻尼自由振动（右）气门工作过程图(k=90N/mm)

Figure 3－5a　Free oscillation without (left) and with (right) damp friction (k=90N/mm)

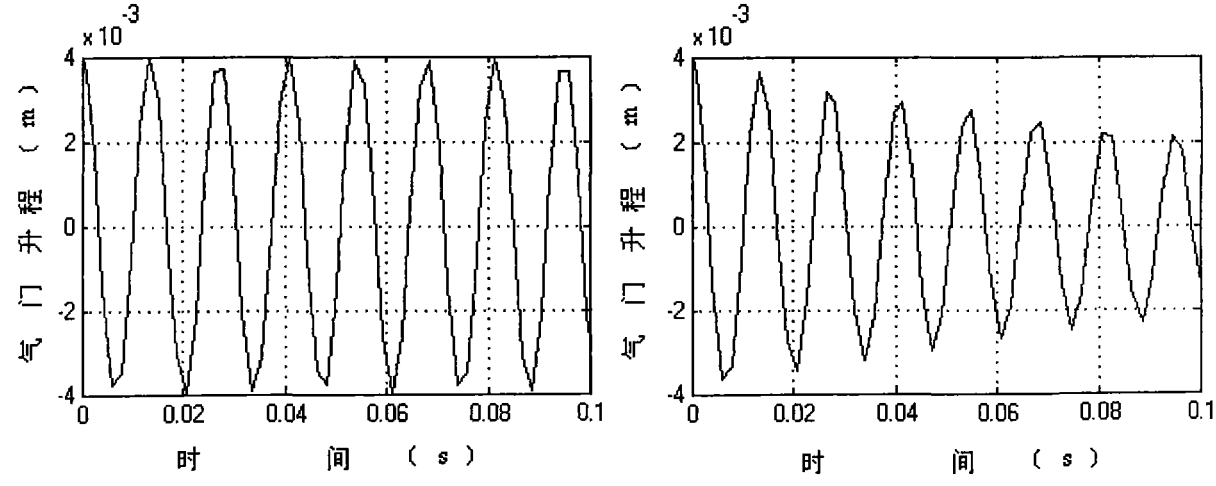


图 3－5b　无阻尼自由振动（左）和阻尼自由振动（右）气门工作过程图(k=30N/mm)

Figure 3－5b　Free oscillation without (left) and with (right) damp friction (k=30N/mm)

3.3.2　电—子系统的建模

图 3－6 所示为系统的下部线圈的电——子系统图，上部线圈与之是完全对称的。线圈被理想化为具有电阻的一个电感线圈，因此环路中的电压降可以用磁链和线圈的电阻来表示。

根据法拉第电磁感应定律和欧姆定律，回路中的电压方程为：

$$U_2=\frac{d\Psi}{dt}+R\cdot i \qquad (3.4)$$

其中：　Ψ——线圈在磁场中产生的磁链（Wb）；

R——线圈回路中的总电阻（Ω）；

i ——通过线圈的电流（A）；

U_2——加在下部线圈上的有效电压（V）。

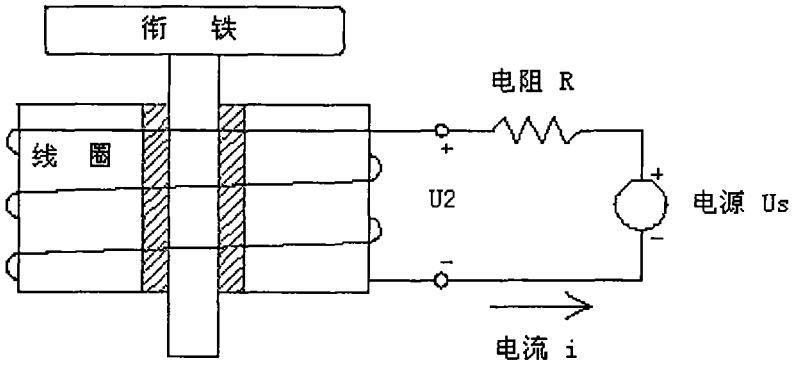


图 3－6　EMVA 系统的下部线圈的电——子系统图

Figure 3－6　Electrical subsystem of the EMVA lower coil

3.3.3　磁—子系统的建模

磁子系统通过磁链与电子系统相联系，同时又通过电磁力与机械子系统相关，因而是三个子系统中最为关键和复杂的。EMVA 系统中的电磁铁采用直流激磁，但由于两个电磁铁交替地通、断电，所以通过其磁路的磁通是随时间作周期性变化的，这样就会在磁导体中产生磁滞损耗和涡流损耗，而导致严重发热，为了尽可能地减少损耗、降低发热，我们自行设计的磁导体采用高阻率的硅钢片制造。图 3－7 所示为由下部电磁铁和衔铁组成的磁—子系统图以及静铁心示意图（上部电磁铁和线圈组成的磁—子系统图与之完全对称）。

（1）磁路方程

根据磁路的基尔霍夫第二定律，电磁铁的磁回路方程可以由下式给出：[54]

$$i \cdot N = \oint_l H \cdot dl = \Phi_1 \cdot R_{m1} + \Phi_2 \cdot R_{m2} + \Phi_3 \cdot R_{m3} \qquad (3.5)$$

式中：　i——线圈中的电流（A）；

N——线圈匝数；

H——导磁体中的磁场强度（A/m）；

l——导磁体的长度（m）；

Φ_1、Φ_2、Φ_3——分别为工作气隙中、静铁心和衔铁的磁通（Wb）

R_{m1}、R_{m2}、R_{m3}——分别为工作气隙中、静铁心和衔铁的磁阻（1/H）；

这里磁阻可以表示为：$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} \tag{3.6}$$

式中：μ——导磁体的磁导率（H/m）；

S——导磁体的横截面积（m^2）

因为空气的磁导率与真空磁导率相差很小，所以求空气隙磁导时可以用真空磁导率。磁阻的倒数称为磁导Λ，即$\Lambda = \frac{1}{R_m}$　　（3.7）

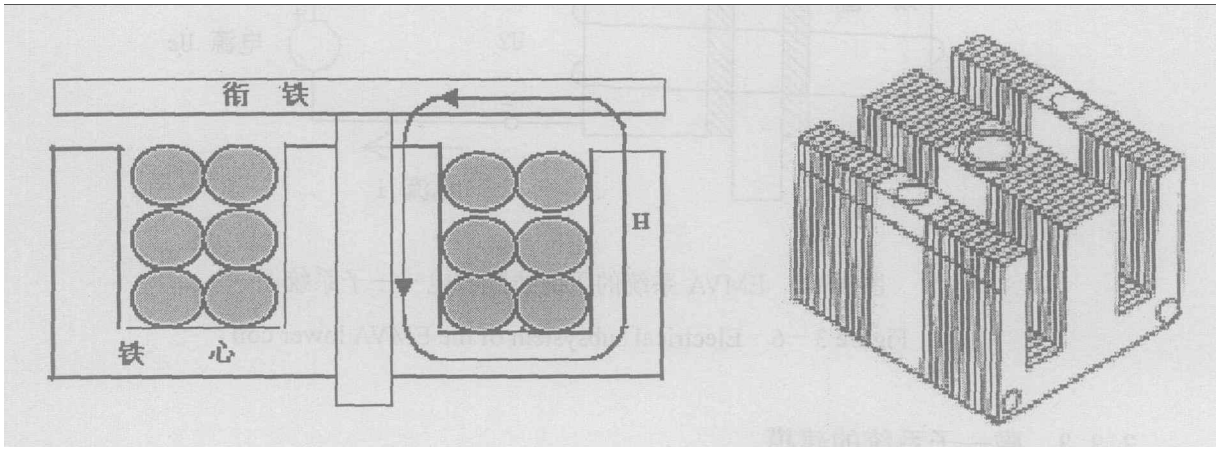


图 3－7　磁——子系统图（左）和静铁心图（右）

Figure 3－7　Magnetic subsystem (left) and iron core (right)

（2）磁场能量

电磁铁的磁场能量，是在建立磁场过程中从产生磁场的电源电能中转化而来的。在t_1时间内，线圈磁链由 0 增大到Ψ_1，储存在磁场中的能量用W_{m1}表示，

即　　$$W_{m1} = \int_0^{\Psi_1} id\Psi \tag{3.8}$$

式中：　Ψ——线圈在磁场中产生的磁链（Wb）；

当电磁铁在吸力作用下，工作气隙值由x_1变为x_2时，衔铁位移距离$\Delta x = x_1 - x_2$，假设线圈电流和磁链都发生变化，磁场又从电源内吸收一部分能量，用ΔW_m表示，则　　$$\Delta W_m = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} id\Psi \tag{3.9}$$

根据磁场的能量平衡关系，当磁路不饱和时，$\Psi = f(I)$为直线，此时磁场能量可以用下式计算：

$$\Delta W_m = \frac{1}{2}(I_1 + I_2)(\Psi_2 - \Psi_1) \tag{3.10}$$

（3）漏磁及电磁力

磁系统中一般都存在漏磁通，这些磁通不通过工作气隙，只通过线圈周围空间和部分导磁体形成回路。当工作气隙较小，而且磁路不太饱和时，漏磁通远小于主磁通（通过工作气隙的磁通），往往可以忽略；但是当工作气隙较大时，漏磁通通常不能忽略，而漏磁通的存在，使铁心和衔铁内各处磁通值不相等，并且使磁路成为比较复杂的串并联磁路。由于 EMVA 系统的衔铁行程较大（可达 8mm），因此不能不考虑漏磁的影响，这样就构成了一个分布参数的非线性问题，大大增加了计算的复杂性和难度。

根据计算电磁吸力的能量平衡方程式，

$$F = -\frac{1}{2}(I \cdot \frac{d\Psi}{dx} - \Psi \cdot \frac{dI}{dx}) \tag{3.11}$$

其中磁链　　$$\Psi = N^2 \cdot I \cdot \left(\frac{1}{\frac{1}{\Lambda_1} + \frac{1}{\Lambda_2} + \frac{1}{\Lambda_3}} + \Lambda_{lc} \right)$$

式中：Λ_1、Λ_2、Λ_3——分别为工作气隙中、静铁心和衔铁的磁导（H）；

Λ_{lc}——等效漏磁导（H）。

综合考虑铁磁阻及漏磁通的影响，电磁力可以表示为：

$$F_x = -\frac{1}{2}U_1^2(\frac{d\Lambda_1}{dx} + \frac{d\Lambda_{lc}}{dx}) \tag{3.12}$$

式中：　U_1——工作气隙的磁压降（A）。

由于 $d\Lambda_1/dx$ 为负值，所以电磁力 F_x 为正值。

§3.4 EMVA 系统模型的仿真计算结果与分析

3.4.1 MATLAB 建模仿真工具的引入

目前存在的动态系统快速仿真软件有近十种，如 MATLAB/SIMULINK、ACSL 以及 MATRIX 等[55]，而其中以 MATLAB/SIMULINK 在国内的使用最为广泛。MATLAB 是美国 Math Works 公司在 80 年代初推出的一套面向科学与工程数值计算的高性能软件，它集科学计算、自动控制、信号处理和图形显示等功能于一体，既拥有方便友好的用户界面又具备很高的编程效率，因此是当前最流行的一种控制系统语言。SIMULINK 是 MATLAB 软件下的一个可对动态系统进行模型的图

形输入与仿真的模块，它能直观形象地对系统模型进行分层描述、参数设置等操作，还允许用户采用图形化流程图式编程语言来模拟一个系统，并可动态地控制该系统。此外，由于 SIMULINK 已经集成于 MATLAB 内部，用 SIMULINK 创建的模型既可以在 SIMULINK 中修改、运行、观测，也可以在 MATLAB 环境下直接进行仿真、调试或数据的后处理[56]。总之，利用 MATLAB/SIMULINK 作为整个系统的建模仿真工具，可以使 EMVA 系统的建模和仿真工作更加直观、灵活和快捷。

3.4.2　模型仿真的实现

基于 EMVA 系统的三个子系统分析的基础上，我们可以得到整个系统的非线性微分方程组如下式所示：

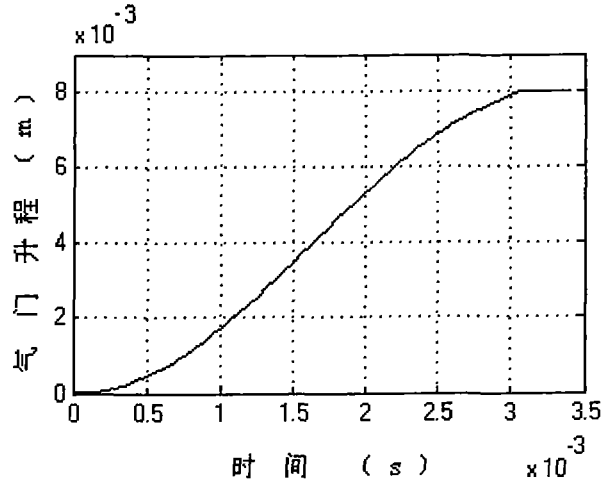
$$U_1=\frac{d\Psi_1}{dt}+R\cdot I_1,$$

$$U_2=\frac{d\Psi_2}{dt}+R\cdot I_2,$$

$$m\ddot{x}=F_{mag1}(x,i)-F_{mag2}(x,i)-F_{k1}+F_{k2}+F_{gas}-F_f \qquad (3.13)$$

在模型仿真中电磁气门的工作条件为：峰值电压为 42V，气门最大升程为 0.008mm，运动质量为 280 g，弹簧刚度为 90N/mm。

如图 3－8 给出了电磁气门由关闭到开启过程中气门升程、线圈电流以及气门的运动速度随时间的变化的仿真结果。



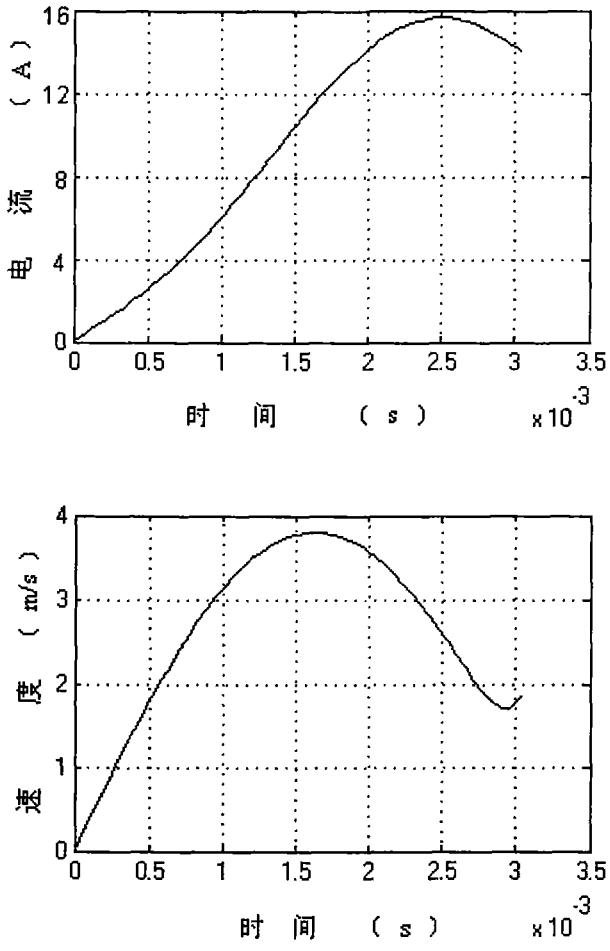


图 3－8　EMVA 系统的模型仿真结果

Figure 3－8　Simulation result of EMVA system

3.4.3　工作参数对 EMVA 工作响应过程的影响

在保持 EMVA 的其它工作参数不变的条件下，通过仿真计算逐一分析某一个参数的变化对 EMVA 工作响应过程的影响。

（1）　驱动电压的影响

仿真中电磁气门的工作条件为：气门最大升程为 0.008mm，运动质量为 280 g，弹簧刚度为 30N/mm。如图 3－9 给出了峰值电压分别为 50V 和 12V 时对电磁气门由开启到关闭过程的影响。

从图中可以看出，峰值电压由 12V 提高到 50V，电磁气门的关闭响应时间便由 8.5ms 缩减到 7.9ms，线圈最大电流由 5.7A 增大到 18.6A，气门落座速度由 0.95m/s 增加到 2.0m/s，电磁力由 450N 增加到 1180N。由此可见，提高峰值驱动

电压可以加速气门关闭，但同时使气门落座速度增大，因此必须综合各方面因素考虑电压的大小。

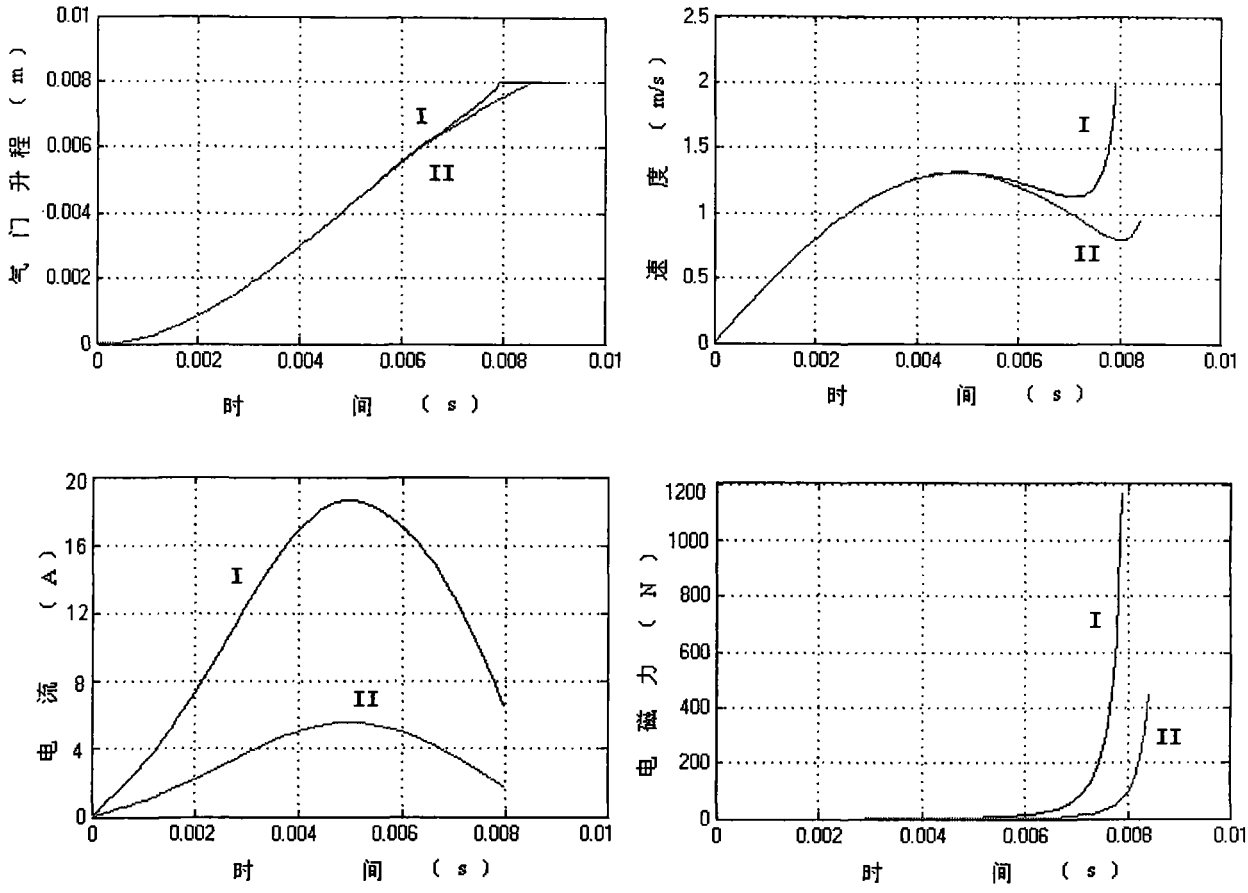


图 3－9　峰值驱动电压对 EMVA 工作响应过程的影响

（其中 I 为峰值电压 50V，II 为峰值电压 12V）

Figure 3－9　Influence of peak voltage to the working process of EMVA

(peak voltage I =50V , peak voltage II =12V)

（2） 弹簧刚度的影响

EMVA系统中的气门、衔铁和弹簧构成了一个弹簧—质量系统。系统正常工作时，气门及衔铁往复运动的主要动力来自弹簧。控制系统的作用是向这个质量—弹簧系统补充在往复运动中因摩擦力和空气阻力而消耗的机械能。在系统运动质量不变的条件下，气门过渡过程（从一个极限位置运动到另一个极限位置）的时间主要取决于弹簧刚度。因此弹簧的作用主要是储存推动衔铁和气门运动的能量，提供驱动力，另外还能使发动机在停机时使气门处于半开半闭状态，以节省初始化阶段的时间。

如图3－10给出了不同弹簧刚度对电磁气门工作过程的影响。

由图中可以看出，当弹簧刚度从30N/mm增加到80N/mm时，电磁气门由开启到关闭的响应时间从7.9ms缩减到5.1ms，气门的落座速度从2.6m/s减小到1.9m/s，所以弹簧刚度对于EMVA系统的影响是非常大的。弹簧刚度小，则系统过渡过程时间变长，气门落座速度变大，不利于系统实现高速和软着陆；弹簧刚度大，EMVA系统过渡过程时间变短，有利于实现软着陆，但克服弹簧力所需电磁力增大，使得机构体积变大，同时弹簧的制造加工也比较困难。

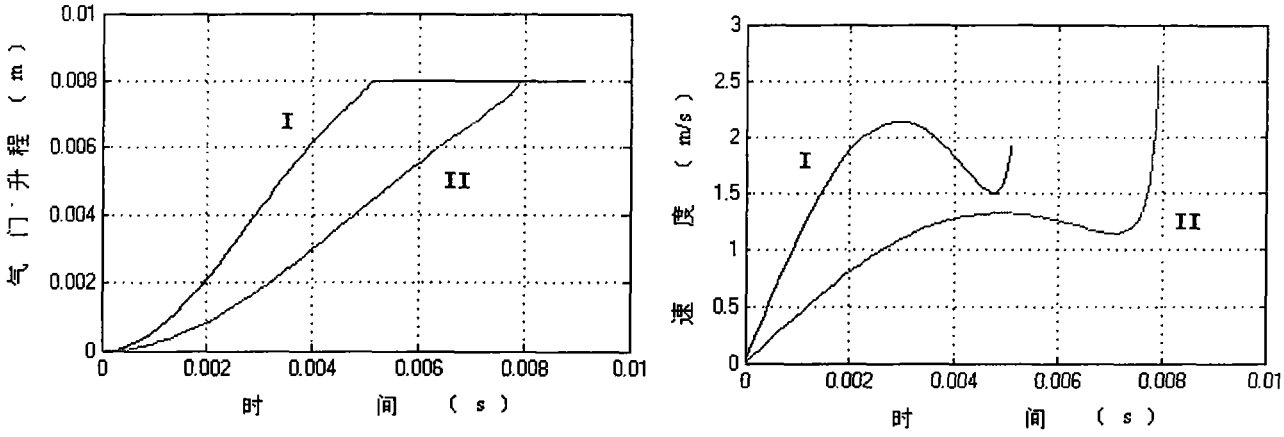


图 3－10　弹簧刚度对 EMVA 工作响应过程的影响

（其中 I 为弹簧刚度 80N/mm，II 为弹簧刚度 30N/mm）

Figure 3－10　Influence of spring stiffness to the working process of EMVA

(spring stiffness I =80N/mm, spring stiffness II =30N/mm)

（3）　运动质量的影响

如图 3－11 给出了电磁气门的运动质量对其工作响应过程的影响。

从图中可以看出，当运动质量由 280g 减少到 180g 时，电磁气门由开启到关闭的响应时间从 7.9ms 缩减到 6.3ms，气门的落座速度从 1.9m/s 增加到 3.0m/s。这是由于在工作升程和电磁作用力相同的情况下，运动质量的减小会使电磁气门关闭和开启过程的运动加速度增大，从而使响应时间缩短和运动速度加大，因此适当减少运动质量有利于气门的快速开启和关闭。而运动质量中气门的质量已经确定，因此只有精心设计衔铁的形状，在保证充足电磁作用力的情况下，尽量减轻衔铁的质量。

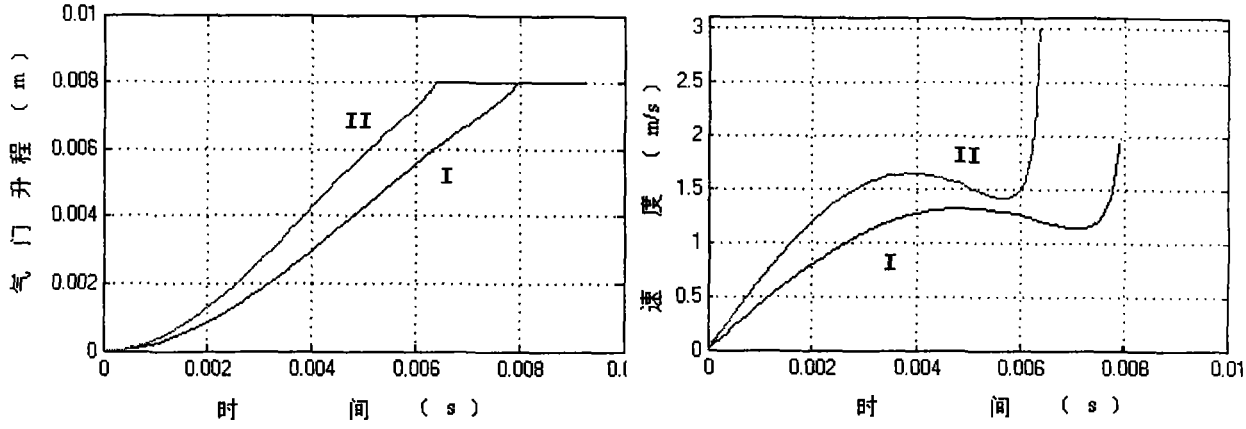


图 3－11　运动质量对 EMVA 工作响应过程的影响

（其中 I 为运动质量 280g，II 为运动质量 180g）

Figure 3－11　Influence of moving mass to the working process of EMVA

(moving mass I =280g, moving mass II =180g)

（4）　涡流的影响[57]

在 EMVA 系统的工作过程中，电磁线圈的电流和磁路中的磁通都随时间不断变化，因而在铁磁材料中产生涡流，其作用总是使磁通的变化落后于线圈电流的变化，使电磁气门开启和闭合的速度大大减慢。另外由于涡流损耗功率的存在，使得激磁线圈电流大于激磁电流，该电流差值用于补偿涡流损耗。涡流对电磁气门动态特性的影响与环绕导磁体的短路线圈的影响是近似等价的，因此，考虑用环绕铁磁材料的短路线圈来等效铁磁材料中产生的涡流。考虑涡流影响后，电压平衡方程变为：

$$\frac{d\psi}{dt}=\frac{U-IR}{w_l} \tag{3.14}$$

式中：　w_l —— 考虑铁磁材料中涡流影响时的转换系数；

I —— 激磁电流（A）；

R —— 线圈回路中的总电阻（Ω）。

如图 3－12 给出了考虑和不考虑涡流影响两种情况下的电磁气门响应过程。从图中可以明显看出，当考虑涡流影响时，电磁气门由开启到关闭的响应时间从 7.9ms 增加到 9.3ms，因此涡流在电磁气门的快速开启和关闭过程中的影响是比较大的，为缩短电磁气门的响应时间，采取措施有效地抑制涡流至关重要。

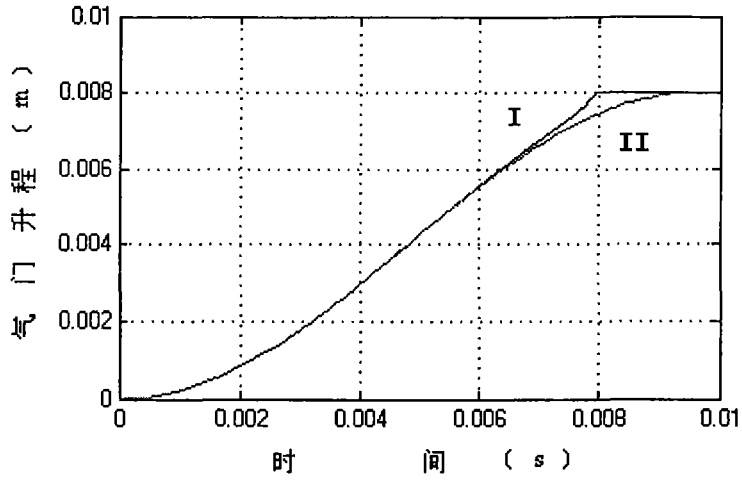


图 3－12　涡流对 EMVA 工作响应过程的影响

（其中 I 为不考虑涡流影响，II 为考虑涡流影响）

Figure 3－12　Influence of eddy current to the working process of EMVA

(I － without the influence of eddy current,　II － with the influence of eddy current)

综上所述，峰值驱动电压、弹簧刚度、运动质量以及涡流等参数的变化对电磁气门的响应过程都有比较大的影响，要想大幅度改进电磁气门的工作性能，必须仔细确定这些参数的相对合理的折衷值，主要应从降低涡流影响和改进控制方法着手。

电磁全可变气门的仿真计算模型的开发为进一步提高电磁阀的工作性能提供了手段。在设计或改进电磁阀时，只需改变模型的初始参数便能够利用模型分析的方法利用仿真计算进行有关工作性能的预测，这就可以大大缩短电磁阀的设计开发周期。运用模型分析方法确定电磁阀工作参数对工作响应过程的影响规律，可以在一定程度上减少电磁阀的试验调整的工作量。但为了能够更加全面地预测电磁阀的工作性能和实现优化设计，该仿真模型还有待进一步完善。

§3.5　电磁全可变气门（EMVA）的实用性开发

根据电磁控制全可变气门的工作过程和工作特性可知，该机构的研制涉及到磁性材料的选择、磁性材料的热处理、静铁心与衔铁结构的合理设计、弹簧的选择以及电磁气门整体装配定位联接件的设计等多方面的内容，是一项工程性很强的工作。

考虑到国内外的研究状况和我们现有的条件，初步选定发动机的额定转速为 2000r/min，气门升程为 8mm。

3.5.1 磁性材料的选择

电磁气门机构中的电磁系统设计是整体设计的关键，而磁性材料的合理选择是实现设计目标和工作要求的基础。

在研制电磁气门的初期，借鉴了国内外科研机构的研究经验，选用软磁材料作为机构的磁性材料。

软磁材料的特点是磁导率大，矫顽磁力小，磁滞损耗小，它适用于旋转电机、变压器、各种电器的电磁机构以及其它要求磁感应强度大而能量损耗小的电工装置。属于软磁材料一类的有：[54]

(1) 钢铁——它包括电解铁和工程纯铁等，其特点是电阻率小，所以多用作直流磁路中的导磁体。

(2) 硅钢——它含有0.8～4%的硅元素，通常被加工成薄板状。硅钢的最大磁导率一般不小于3500～4500μ_0（μ_0——真空中的磁导率，其值为$4\pi\times10^{-7}$亨/米），矫顽磁力不大于64～96安/米。硅钢片在交变磁场中的功率损耗与其含硅量、厚度、磁场的磁感应强度以及频率等有关。在50赫兹交变磁场中，每千克硅钢的功率损耗为0.5～13.4瓦，随着频率的增加，功率损耗将增加。硅元素在硅钢中的作用在于：第一，增大磁导率，减小矫顽磁力和降低磁滞损耗；第二，增大电阻率，降低涡流损耗，并减小电阻温度系数；第三，降低磁性老化。含硅量低的硅钢一般用于旋转电机以及低压电器中的电磁铁，含硅量高的则多用于变压器和互感器。

(3) 坡莫合金——它是含镍36～80%、其它金属元素2～10%，其余为铁的一种高导磁率铁镍合金。其最大磁导率可达（1～2）$\times10^5\mu_0$。坡莫合金的缺点是电阻率较小，且又不能承受机械应力。它主要用于制作弱磁场下需要特高磁导率的电磁元件。

(4) 软磁铁氧体——铁氧体是一系列含有氧化铁的复合氧化物材料（或者称为陶瓷材料）。铁氧体的特点是饱和磁感应强度很低（0.5T以下），但导磁率比较高，而且电阻率很高（这时因为铁氧体是由很小的颗粒压制成的，颗粒之间的接触不好，所以导电不佳），因此非常有利于降低涡流损耗。正因为如此，铁氧体能够在很高的频率下（可以达到兆Hz甚至更高）使用，而它的饱和磁感应强度低，因此不适合在低频下使用。铁氧体最广泛的用途是高频变压器铁芯和各种电感铁芯。

软磁材料的直流磁性能指标是动态磁化过程中所能达到的极限指标，没有较高的直流磁性能指标，即使完全消除了涡流和磁滞损失的影响，电磁铁也无法提供较大的电磁力来满足系统对强力的要求。因此为了满足系统高速强力的需求，

确定了下列选择软磁材料的原则：

（1）高磁导率，在磁势很小（在电流开始上升阶段电流较小时）的情况下就能产生较大的磁通量（相当于较大的电磁力）；

（2）高的饱和磁感应强度，能给电磁气门提供大的电磁作用力；

（3）矫顽力要低，以减少电磁铁剩磁的影响；

（4）电阻率要相对较大，降低涡流的影响。

国外软磁材料的磁性能要远远优于国产的，但是由于价格较高，将加大电磁铁的制作成本，不利于进一步的产品化开发，因此，合理选择制作电磁阀用的国产软磁材料就显得非常重要。

表3－2给出了国内在电器制造领域中应用比较广泛的几种软磁材料的直流磁性能比较结果[52]。

表3-2　国产软磁材料直流磁性能比较

Table 3－2　Comparison of D.C. magnetic properties of domestic soft magnetic material

材料	磁感应强度（T）							矫顽力（A/cm）
	B_1	B_3	B_5	B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	
Fe-Co合金		0.79		1.7	1.9	2.05	2.25	2.0
电工纯铁		1.28		1.56	1.66	1.76	1.94	1.0
Fe-Al合金	0.45	1.13	1.26	1.36	1.45			0.69
Fe-Si合金	1.12	1.39	1.44	1.49	1.58			0.41

注：B_1、B_3、…、B_{100} 分别表示磁场强度H为1A/cm、3A/cm、…、100A/cm时的磁感应强度。

由表中可以看出，在低场H<5A/cm时，铁硅合金的磁性能要优于其它三种软磁材料，而且其矫顽力也要低于其它三种软磁材料。

经过以上综合比较分析，最后选取软磁材料——硅钢作为电磁全可变气门机构中电磁铁的初期制作磁性材料。

3.5.2　磁性材料的热处理

软磁材料经过机械加工后，其金属材料晶格结构中会产生内应力，可较大程度地降低材料的磁导率。因此在加工成型后必须进行退火热处理以改善其磁性能。磁性材料的退火处理有三个方面的作用：一是使破碎和扭曲的晶粒得到恢复；二是使晶粒变得粗大；三是采用特殊的退火工艺可以起到清除碳、氮等杂质的作用。这样可以大大提高和稳定软磁材料的磁性能[11]。

磁性材料的热处理对于材料的磁性能影响非常大，图3-13给出了对于同一种Fe—Si合金材料在加工态和热处理后的磁性能，可以明显看出同一种磁性材料热处理后的磁性能远远高于其加工态的磁性能。另外，对同一种材料，不同的退火工艺规范、不同的退火方式甚至放在退火炉中的不同位置都会对其磁性能产生较大的影响。因此，为了提高磁性材料的磁性能和保证磁性能一致，必须严格控制热处理过程、合理选择退火方式与退火工艺规范。

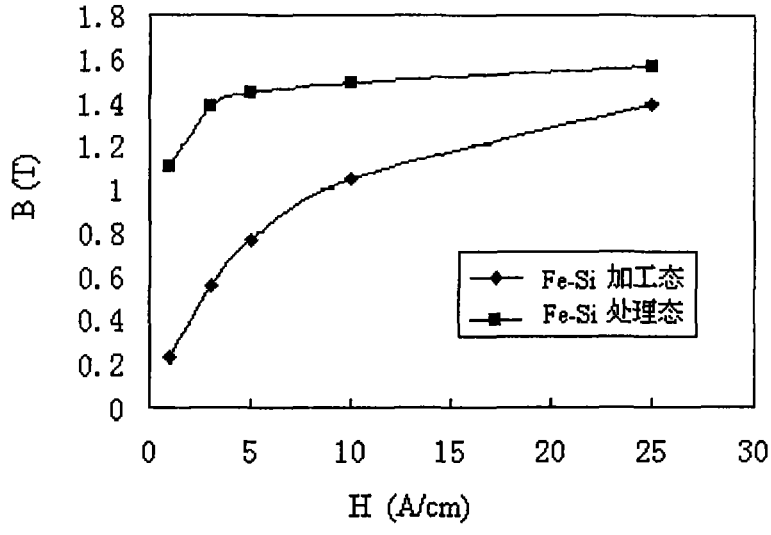


图3-13　磁性材料在加工态和热处理后的磁性能变化[52]

Figure 3－13　Magnetic properties variation of forged and heat treatment magnetic materials

3.5.3　静铁心与衔铁的结构设计

电磁气门虽然采用汽车上的直流电源供电，但是实际上是用PWM方式驱动的，即利用脉冲直流信号来控制电磁铁线圈中的电流，由于电流是变化的，所以通过其磁路的磁通是随时间作周期性变化的交变磁通，这样电磁铁的磁导体中必然会产生磁滞损耗和涡流损耗，因此在设计时不能将其简单地视为直流电磁铁进行设计。

静铁心和衔铁结构的合理设计是磁路设计中的关键环节，因为合理的结构设计可以确保磁路漏磁少、铁损小，使得整个电磁阀具有电磁力大、能耗小等优点，使系统能够满足高速、强力的要求。

1．电磁铁结构设计的方案选择

根据第二章的文献综述可知，在国外已经开发出的双弹簧电磁气门机构中，其电磁铁主要有三种结构形式，一种是FEV公司设计的长方形电磁阀[59]，静铁心外型近似为长方体，衔铁形状为长方形，双弹簧分别放在上下静铁心的上面和下

面，虽然使纵向尺寸要增大但使整个电磁阀的横向尺寸减小；一种是 Aura Systems 公司设计的圆柱形电磁阀[60]，双弹簧放置在静铁心的中间，静铁心外形为柱状，衔铁为圆盘形，这样使整个电磁阀的纵向尺寸减小而横向尺寸增大；还有一种是 Simens 公司设计的外形为矩形的电磁阀[61]，其静铁心采用长方形的铁磁材料堆叠而成，主要是为了减少能量消耗，双弹簧也是分别放在上下静铁心的上面和下面，这有利于在有限的空间内布置更多的发动机气门，更适合于多气门发动机。国内清华大学设计的电磁铁与 Aura Systems 公司的结构相似[37]。

参考国外的研究情况，本课题决定采用类似于 Simens 公司的设计方法，即设计成矩形电磁铁结构，用高电阻率的硅钢片叠在一起来制作磁导体，这主要是由于它具有以下几方面优点：

（1） 该结构设计方式，可以减少磁滞损耗和涡流损耗。

（2） 为电磁线圈提供了更大的散热面积，提高了电磁线圈的散热能力，有利于输入更大的能量。

（3） 结构简单，刚度好，易加工，适合大批量生产。

2. 电磁铁主要尺寸的确定

（1）静铁心的设计

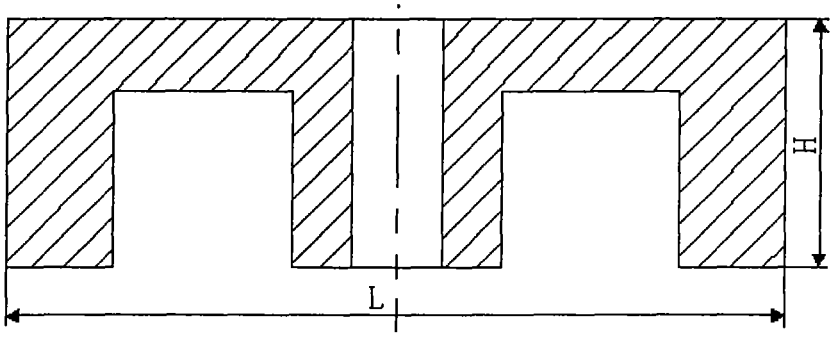


图3-14　静铁心外形及尺寸示意图

Figure 3－14　Outline diagram of the iron core

静铁心采用矩形硅钢片制作成叠片式结构，制作时先把硅钢片冲制成所需的形状，然后再叠合到所需的厚度，最后再用铆钉把这些冲片铆装在一起，最后做成矩形的铁心柱。

电磁阀要获得较大的电磁力就必须保证有足够的电磁作用面积，电磁阀只有产生足够大的电磁作用力才能保证气门快速开启、可靠关闭。因此在设计时应充分考虑电磁作用力的余量。

在借鉴国外开发电磁阀经验的基础上，经过电磁作用力的校核计算后确定自

行研制的电磁阀的静铁心的长L为70mm，高H为35mm。静铁心外形示意图如图3-14所示。

（2）衔铁（动铁心）的设计

在电磁阀中衔铁一方面与静铁心共同构成磁路产生电磁作用力，另一方面又与气门、气门座、双弹簧的三分之一质量构成系统的运动质量。为提高系统的响应速度，应尽可能减小运动质量。但为了与静铁心构成有效磁路，衔铁又必须满足一定的尺寸要求。

在不影响有效磁路通路的情况下，采取了开孔的办法清除了一部分衔铁的冗余质量，开孔的目的还可以减少衔铁在运动过程中空气阻尼的影响。同时合理设计衔铁的形状也有助于减轻衔铁的质量。

根据文献[52]，衔铁最大外径略小于静铁心最大外径时，电磁作用力几乎没有减小，因此确定制作的与静铁心相配的衔铁长取为65mm。衔铁的结构如图3-15所示。

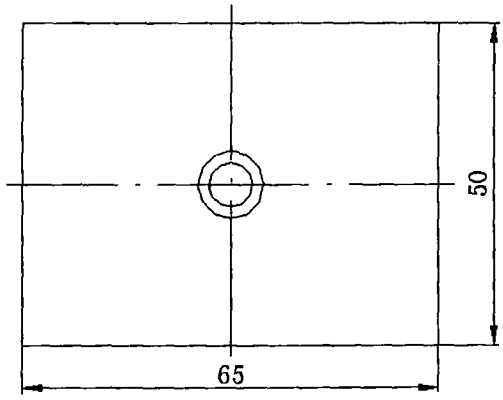


图3-15　衔铁的结构示意图

Figure 3－15　Outline diagram of the armature

3.5.4　电磁线圈的设计

线圈是一切电磁系统的重要组成部件，通过它产生磁势使电磁系统工作。线圈本身由于导线的电阻损耗将发热，而线圈发热对系统的性能和尺寸有很大的影响。电磁系统的工作可靠与否，在相当大的程度上是由线圈的结构形式和结构参数所决定的。

设计线圈要从两方面着手：一方面要根据具体要求选择结构形式，并进行工艺设计；另一方面要进行线圈的参数计算。[54]

线圈的基本结构形式分为有骨架的和无骨架的两类。所谓无骨架线圈，就是指无特制骨架以支持导线、而需要用包扎带把导线扎紧的线圈；有骨架线圈，则

是指有钢纸板、纤维纸板、胶木塑料等制成的骨架以支持导线的线圈。为了防止或减少来自磁导体的热量，我们将线圈做成有骨架的形式，并且线圈也是矩形的，形状矮胖，线圈与铁心之间的间隙较大，以利于散热。

在结构形式确定之后，就可以进行线圈的参数计算。在一定的工作参数下，线圈必须满足下列三个方面的要求：

（1） 应当能够产生规定的安匝磁势；

（2） 在规定的工作制下，线圈的温度不会超过它的容许值；

（3） 线圈的尺寸应当能够同铁心窗口的尺寸互相配合。

考虑到电磁阀的快速响应和强作用力特性，并且忽略铁磁体的磁阻影响，可以由下式近似求出电磁线圈所需的匝数：

$$IN = \frac{U}{R}N \tag{3.14}$$

式中：I——线圈电流；　　N——线圈匝数；

U——线圈的工作电压；　　R——线圈的电阻。

线圈匝数N和电流I具体值的确定是折衷考虑的结果，本质上是要确保能够提供足够的磁势，产生高的磁感应强度。在实际设计时，要求电流具有较高的变化率，但由于车载蓄电池电压较低，只有采用匝数少、电感低的线圈设计方式才能满足这一要求。然而为了保证提供足够的磁势，线圈匝数少，电流值便要很大，而为提高电流承载能力和耐热能力，漆包线直径就要很粗，驱动电路的制作难度和成本也会大大增加。最后，经过计算校核了电磁阀的线圈制作指标：线圈匝数取170匝，漆包线直径取1.0mm。

3.5.5 储能弹簧的设计

电磁气门机构中弹簧的作用是储存及输出能量，减少落座冲击，节省气门运动初始化阶段的时间以及降低能量消耗。

弹簧刚度对于电磁气门系统的影响是非常大的。弹簧刚度小，则系统过渡过程时间变长，不利于上高速。弹簧刚度大，系统过渡时间短，但克服弹簧力所需的电磁力也增大，使得整个机构体积变大，同时弹簧的制造加工也比较困难。因此，在初步设计时将弹簧的刚度取得小一些，以便于制造。

为了保障弹簧能够可靠地工作，其材料除应满足具有较高的强度极限和屈服极限外，还必须具有较高的弹性极限、疲劳极限、冲击韧性、塑性和良好的热处理工艺性等。因此在设计中，两个弹簧采用同样的参数，即两个弹簧可以互换。

弹簧的材料选用 50CrVA，选用 50CrVA 是材料的性能和价格的折衷考虑。

50CrVA 钢中加入钒的目的是细化组织，提高钢的强度和韧性，故这种材料是耐疲劳和抗冲击性能良好的弹簧钢。它的许用切应力[τ]为 588Mpa，许用弯曲应力[σ_b]为 920MPa，而且这种材料具有良好的机械性能，高疲劳强度，淬透性和回火稳定性好，并能在-4O~350℃的温度下工作。

3.5.6　整体装配联接件的设计

电磁阀装配连接件用以保证电磁阀的上下静铁心之间，衔铁和静铁心以及气门中间的准确定位和合理安装。

合理设计装配连接关系有利于通过调整两个静铁心之间的距离，来保证气门升程的精确调整；有利于保证静铁心和衔铁间工作间隙的均匀性，使电磁阀产生的作用合力指向运动方向，对运动阀杆不产生弯曲力矩，从而减少由于弯曲力矩造成的阀杆磨损和不同电磁阀运动功率的差异等。

图 3－16 给出了自行研制的电磁阀的装配连接关系。电磁阀的上下静铁心利用电磁铁座定位，套筒内圆面为定位面确保上下静铁心的同轴度。衔铁和气门之间的定位依靠衔铁锥孔内表面，确保衔铁和气门的垂直度和同轴度，它们之间为接触连接。外壳体和下底座之间的定位及联接依靠下预紧螺栓；上壳体和电磁铁座之间的定位及连接依靠紧固螺钉。

在发动机不工作时，气门是处于半开半闭状态的，此时衔铁应处于上下静铁心工作间隙的中点，这可以通过调节上、下预紧螺栓来调节弹簧的预紧力实现。气门升程的大小可以通过调节调整垫片的厚度来改变。

另外，由于铁磁体受到反复撞击时会有磁性能的明显减退，为了避免衔铁撞击静铁心，采取了如下措施。在气门关闭时，衔铁与上、下静铁心之间的残余间隙通过调整垫片来调节；在气门全开时，让衔铁下端凸台底面与气门导管上端面相接触，而衔铁不接触下静铁芯。

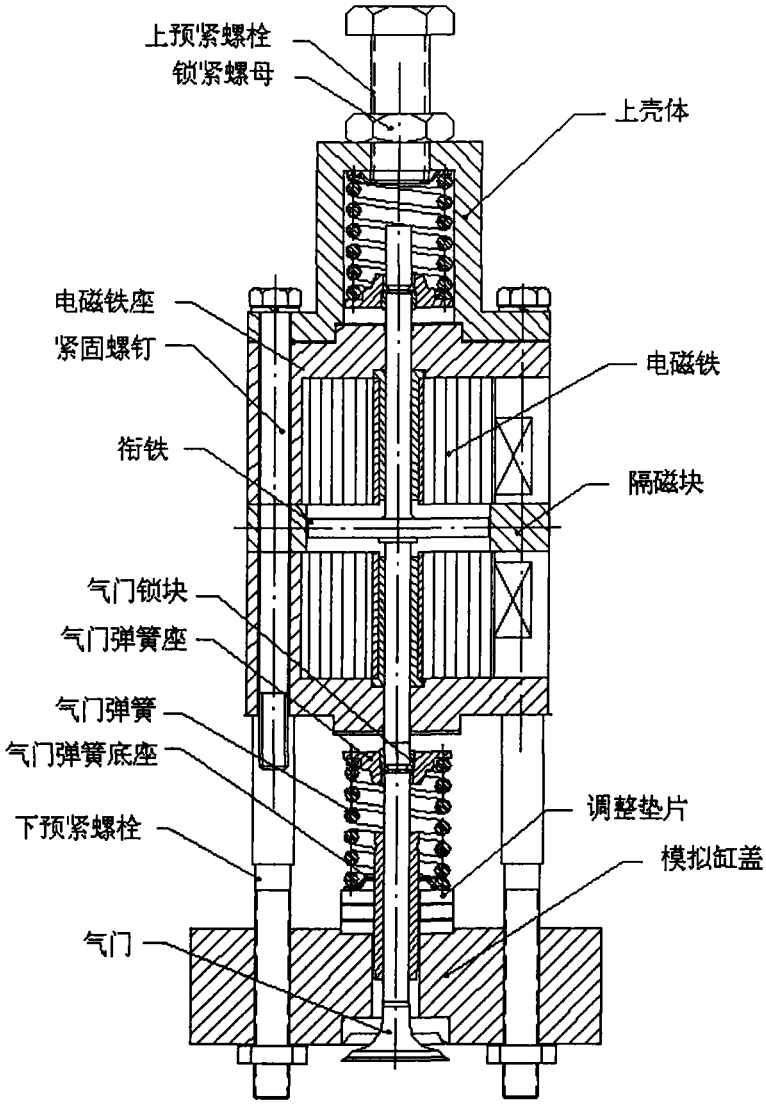


图 3－16　电磁阀的装配联接关系示意图

Figure 3－16　Assembly diagram of the EMVA

本章小节

通过分析电磁可变气门的工作过程和工作特性，以 MATLAB/SIMULINK 软件作为平台，建立其数学模型并进行仿真计算，为进一步的研究提供了参考依据。通过仿真计算讨论了不同驱动电压、弹簧刚度、运动质量以及涡流对电磁气门工作响应过程的影响，只有合理选择这些参数的折衷值，尤其是减少涡流的影响，才能大幅改进 EMVA 机构的工作性能。

根据仿真计算结果和国外的研究经验，进行了 EMVA 机构的实用性开发，通过选择磁性材料以及静铁心、衔铁、线圈和弹簧等的结构设计自行研制了一套电磁气门机构，为进一步的试验研究和电磁气门性能的改善提高打下了基础。

第四章 电磁全可变气门系统的控制

本章的主要内容：

为了精确地控制 EMVA 系统的输出量（即位移），提高电磁气门的响应速度和稳定性，实现气门软着陆，设计了以位移输出为系统状态反馈量的两种控制系统：PID 控制和反馈－前馈迭代学习控制，研究了其控制特性，并对这两种控制特性作了比较。

§4.1 控制理论概述

控制理论的发展经历了经典控制理论和现代控制理论两个阶段。经典控制理论主要以 Laplace 变换和 Z 变换为数学工具，用传递函数方法描述系统的动态特性，用频域响应、根轨迹分析等理论设计控制系统，对单输入单输出的线性时不变系统的分析和综合是有成效的。现代控制理论以线性代数为数学工具，用状态空间方法研究系统的稳定性、能控性等问题，可以用来解决多输入多输出、线性或非线性系统的问题。

随着工业的发展，控制工程遇到了许多前所未有的困难，诸如被控对象的动态未知或部分未知，动态特性随时间有未知漂移（时变性），环境有干扰等。经常存在这样的情形：被控对象的特性过于复杂（如非线性、分布参数、大滞后等），难以准确描述，即使能描述清楚，模型也是十分复杂的。在这些场合要想利用现有控制理论，包括经典的和现代的理论设计一个理想的控制系统是不容易的。然而，受高科技及工业系统发展的推动，控制技术也在继续向纵深发展，这样，推动了自动化领域涌现出一系列新型的控制系统，主要包括：非线性控制、智能控制、模糊控制和迭代学习控制等系统[62]。

非线性控制系统是以李雅普诺夫理论为基础的，微分几何方法使得非线性控制系统理论获得了巨大的进展，目前研究的一些复杂非线性现象包括混沌、突变、分叉及分形等问题，如何从观测到的输入输出信息去辩识这些模型是当前非线性科学的一个热门课题。

智能控制的结构是：识别—推理—决定—执行。对于难以建立精确数学模型的非线性、时变性和不确定性过程，把人工智能和控制理论结合起来，使控制系统的设计不完全依赖于被控对象的数学模型，而主要利用人的有关知识使被控对象按一定要求达到预定的目的。

“模糊控制”主要是指事物差异的中间过度中的“不分明性”，所谓模糊控制，

就是将工艺操作人员的经验加以总结，运用语言变量和模糊逻辑的理论，归纳出控制算法的控制。在工业上，有许多复杂对象，特别是对无法建立精数学模型的工业对象的控制，用常规仪表控制效果不佳时，模糊控制往往可获得满意的效果。

迭代学习控制基于前次迭代时的输入输出动态信息，应用学习算法，获得本次迭代控制所需的输入，经过若干次迭代，以期达到在给定的时间区间上实现被控对象以较高的精度跟踪一给定的期望轨迹。

图 4－1 给出了 EMVA 系统的计算机仿真控制系统图。其中通过给电磁阀机构的上、下两个电磁铁线圈施加电压信号作为控制手段，控制目的是使气门按照预定轨迹精确地开启并且实现软着陆。

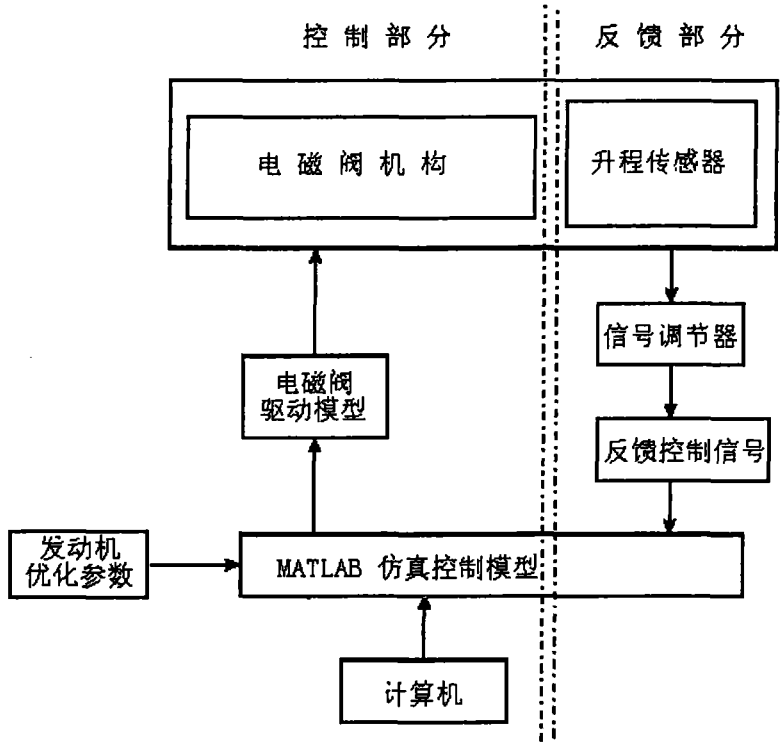


图 4－1　　计算机仿真控制系统图

Figure 4－1　Simulation system diagram of EMVA

§4.2　EMVA 控制系统的难点

一般来说，控制系统的任务就是寻求控制 $u(t)$ 使得输出 $y(t)$ 达到所要求的形式。其中主要包括两种控制任务：一种是寻找控制 $u(t)$，使得输出 $y(t)$ 尽可能地接近某平衡点，即 $\lim_{t\to\infty} y(t)=0$（渐进调节）；另一种是寻找控制 $u(t)$，使得偏差

$e(t)=r(t)-y(t)$尽量小（其中$r(t)$为参考信号），即$\lim_{t\to\infty}e(t)=0$（渐进跟踪）。实际工作过程中也存在另外一类跟踪问题——有限时间区间上的完全跟踪问题，它的控制任务是寻找控制$u(t)$，使得输出$y(t)$在有限的时间区间$[0,T]$上沿整个期望轨迹实现零误差跟踪，即$e(t)=0$，$t\in[0,T]$。纵观各阶段控制理论用于系统描述的数学工具和采用的分析综合方法，可以看出这类跟踪问题是具有挑战性的控制问题。

根据电磁气门的工作过程和工作特性，可以知道它的控制不同于普通的电磁阀控制，普通的电磁阀只需控制其开、关两个状态，能够迅速启闭就达到了控制的目的。而电磁气门的控制属于有限时间区间上的完全跟踪问题，需要控制这个具有高度非线性的系统在有限的时间区间内快速精确地执行轨迹跟踪任务，因此远比控制普通的电磁阀复杂困难。

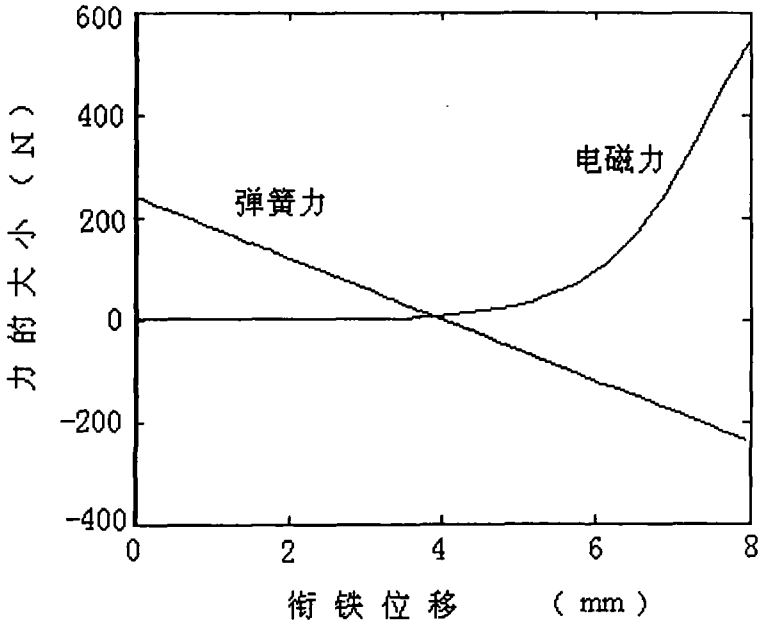


图 4－2　电磁力和弹簧力随衔铁位移变化的比较图

Figure 4－2　Comparison of electromagnetic force and spring force vary with the valve position

EMVA 控制系统的另外一个关键和难点就是气门软着陆的实现。因为气门的运动阻力对于电磁力和弹簧力来说相对很小，因此可以认为电磁力和弹簧力是影响气门运动轨迹和落座速度的决定性因素，图 4－2 示出了峰值驱动电压为 12V，弹簧刚度为 30N/mm 时电磁力与弹簧力大小随衔铁位移变化的比较情况。弹簧力和衔铁的位移成正比关系，即$F_k\propto x$，电磁力与衔铁距铁心的距离的平方成反比

关系，即 $F_{mag} \propto 1/x^2$。当衔铁靠近上面通电的静铁心时，由于弹簧力呈线性增加，电磁力按抛物线形式增加，因此如果不对电流进行迅速有效地控制，使其降到某个较小的数值，那么将会产生很高的落座冲击速度，但是如果电流过小，则气门又会无法落座，因此需要快速精确的控制。

由图 4－2 中我们可以看出，电－磁系统和机械子系统之间的作用是相互限制的，当衔铁距离铁心的距离超过 2mm 时，电磁力相对弹簧力来说对衔铁的作用就很小，这时衔铁的运动主要由弹簧力和阻尼力决定，因此，输出的电压信号仅仅在行程的 15%中起作用。

总之，由于 EMVA 系统的高度的非线性、参数的不确定和扰动的影响使得要实现气门软着陆非常困难。

§4.3　PID 控制

在控制过程中，经典的 PID 控制器在工业应用中仍占很大的比重，有半数以上的对象采用常规 PID 控制器即可达到满意的控制效果[63]。其原因不仅在于这种控制器结构简单，物理意义明显且调整方便，已经为广大工程师所熟悉，更重要的是这种控制器稳定性好，可靠性高，系统设计调整并不要求过多的关于受控对象的先验知识，可适用于各种不同形式的受控对象，换句话说，这种控制器具有较强的鲁棒性。下面我们就用这种经典的控制方法对 EMVA 系统进行控制。

4.3.1　非线性数学模型的线性化

实际上我们接触到的系统都是非线性系统，然而在某个参考状态的某个有限范围内可以采用近似线性化的分析方法。非线性系统的线性化，使我们有可能应用大量的线性分析方法，从而揭示有关非线性系统的行为信息。

假设非线性系统的一般形式为：

$$\frac{d}{dt}X(t) = AX(t) + F(X,U,t) + BU(t) \qquad (4.1)$$

$F(X,U,t)$ 包括系统所有的非线性项。系统的状态变量和输入可以表示成：

$$\begin{aligned} X(t) &= X_0(t) + \delta X(t) \\ U(t) &= U_0(t) + \delta U(t) \end{aligned} \qquad (4.2)$$

X_0 为非线性系统的参考点处的状态和输入。将式（4.2）代入（4.1），得到

$$\frac{d}{dt}X_0(t) + \frac{d}{dt}\delta X(t) = AX_0(t) + A\delta X(t) + F(X_0 + \delta X, U_0 + \delta U, t) + BU_0(t) + B\delta U(t)$$

（4.3）

将上式在参考点附近进行一阶泰勒展开，对于其中第i个等式，其一阶近似为：

$$f_i(X,U,t) \approx f_i(X_0,U_0,t) + \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial f_i}{\partial x_j}\Big|_{X_0,U_0} \delta x_j + \sum_{k=1}^{M} \frac{\partial f_i}{\partial u_k}\Big|_{X_0,U_0} \delta u_k \qquad (4.4)$$

写成矩阵形式：

$$F(X,U,t) = F(X_0 + \delta X_0 U_0 + \delta U,t) \approx F(X_0,U_0,t) + J_x(X_0,U_0)\delta X(t) + J_u(X_0,U_0)\delta U(t) \qquad (4.5)$$

其中，$J_x(X_0,U_0)$和$J_u(X_0,U_0)$是系统在参考点处的 Jacobian 矩阵，即

$$J_x = \left[\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right] \quad , \quad J_u = \left[\frac{\partial f_i}{\partial u_k}\right] \qquad (4.6)$$

系统在参考点附近同样有　$\frac{d}{dt}X_0 = AX_0 + F(X_0,U_0,t) + BU_0$　（4.7）

将式（4.5）和式（4.7）代入式（4.3），得到非线性系统的线性化模型为：

$$\frac{d}{dt}\delta X(t) = [A + J_x(X_0,U_0)]\delta X(t) + [B + J_u(X_0,U_0)]\delta U(t) \qquad (4.8)$$

对于 EMVA 这个非线性系统，在气门由开启到关闭这个过程中，选取气门落座时的位置为参考状态，经过线性化计算后得到系统的传递函数为：

$$G_{lp}(s) = \frac{1}{0.41s^2 + 10.19s + 28900} \qquad (4.9)$$

4.3.2 PID 控制的实现

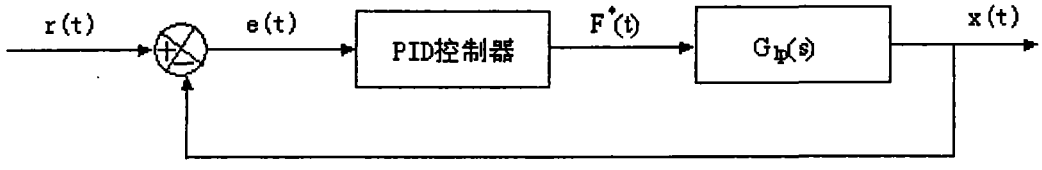


图 4－3　系统的 PID 控制框图

Figure 4－3　Block diagram of PID control of EMVA

图 4－3 给出了 PID 反馈控制的系统框图。其中 r(t)为气门运动的理想轨迹，x(t)为气门实际输出的运动轨迹，e(t)为两者之间的误差，$G_{lp}(s)$为线性化系统的传递函数，$F^*(t)$为经过调整输出的力。

（1）　理想运动轨迹的生成

电磁气门的理想运动轨迹是根据多项式拟合计算得到的。假设气门的理想运动轨迹可以用如下多项式表示：

$$y(t) = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 + a_4 t^3 + a_5 t^4 + a_6 t^5 \qquad (4.10)$$

首先从第三章的仿真结果中选出一个比较理想的气门运动轨迹，如图 4－4 所示是一条光滑的连续曲线。因为从前面的分析可以知道，输出的电压控制信号仅在接近气门落座位置时有效，所以在接近气门关闭的位置选取 1、2、3 三个点，将它们的位移和时间大小作为三个求解式（4.10）的边界条件；然后选取气门落座时那一点的位移、速度、加速度作为求解式（4.10）的另外三个边界条件。有了以上的六个边界条件，使用 MATLAB 进行求解计算，就可以得出多项式表示的气门理想运动轨迹 $y(t)$。

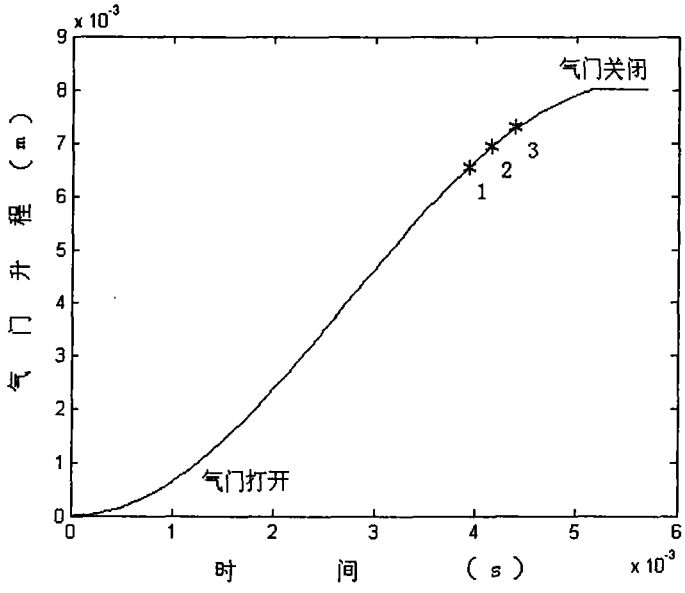


图 4－4　电磁气门的理想运动轨迹

Figure 4－4　Desired trajectory diagram of EMVA

（2） PID 参数的确定

比例控制器实际上是一种增益可调的放大器，它的作用是控制系统趋于稳定。比例控制器的输出 $u(t)$ 与作用误差信号 $e(t)$ 之间的关系为：

$$u(t) = K_p e(t) \quad 或 \quad u(s) = K_p e(s) \qquad (4.11)$$

式中 K_p 为比例增益。

积分控制器的作用主要是消除偏差，即稳态误差，其输出 $u(t)$ 与作用误差信号 $e(t)$ 之间的关系为：

$$u(t)=K_i\int_0^t e(t)dt \quad 或 \quad u(s)=\frac{K_i}{s}e(s) \tag{4.12}$$

式中K_i为可调常数。

微分控制作用有时也称速率控制，它是控制器输出中与作用误差信号变化率成正比的那一部分。微分控制作用具有预测的优点，但不能单独使用，因为这种控制作用仅仅在瞬态过程中才是有效的。比例加微分控制器的输出$u(t)$与作用误差信号$e(t)$之间的关系为：

$$u(t)=K_pe(t)+K_pT_d\frac{de(t)}{dt} \quad 或 \quad u(s)=K_pe(s)+K_pT_dse(s) \tag{4.13}$$

式中T_d为微分时间常数，是速率控制作用超前于比例控制作用效果的时间间隔。

如果控制对象的传递函数中不存在积分器，则当对其进行比例控制时，阶跃输入信号的响应将存在偏差，若包含积分控制作用，则可以消除偏差，但是积分控制作用在消除偏差（即稳态误差）的同时，也导致了使使振幅不断增加的振荡响应。

当把微分控制作用加进比例控制器时，就提供了一种获得高灵敏度控制器的方法。微分控制作用能够反映误差信号的变化速度，并且在作用误差的值变得很大之前，产生一个有效的修正。因此微分控制可以预测作用误差，使修正作用提前发生，从而有助于增进系统的稳定性。

因为微分控制实际上是超前的，它可以测量瞬时误差速度，提前预测大的过调量，并且在产生过大的过调量之前，产生一个适当的反作用。所以针对 EMVA 机构的工作特点，采用比例加微分控制作用可以在令人满意的瞬态响应特性与稳态特性之间取得折衷的效果。

比例加微分（PD）控制器的传递函数可以用下式表示：

$$G_c(s)=K_p+K_ds \tag{4.11}$$

则控制系统的前向传递函数为：

$$G_{fp}(s)=G_c(s)\cdot G_{lp}(s) \tag{4.12}$$

控制系统的闭环传递函数为：

$$G_{cl}(s)=\frac{G_c(s)\cdot G_{lp}(s)}{1+G_c(s)\cdot G_{lp}(s)} \tag{4.13}$$

比例系数K_p可以由稳态误差e_{ss}来确定：

$$e_{ss}=\lim_{s\to 0}\frac{1}{1+G_{fp}(s)} \tag{4.14}$$

假设需要的稳态误差为 0.01，则通过式（4.14）可以求解出K_p=2861100。

微分系数K_d可以通过求解闭环传递函数的特征方程来得到：

$$1+G_c(s)\cdot G_{lp}(s)=s^2+2\omega_n\zeta s+\omega_n^2 \qquad (4.15)$$

假设ζ的值为 1.0，代入前面解出的K_p值，就可以解出K_d＝2166。

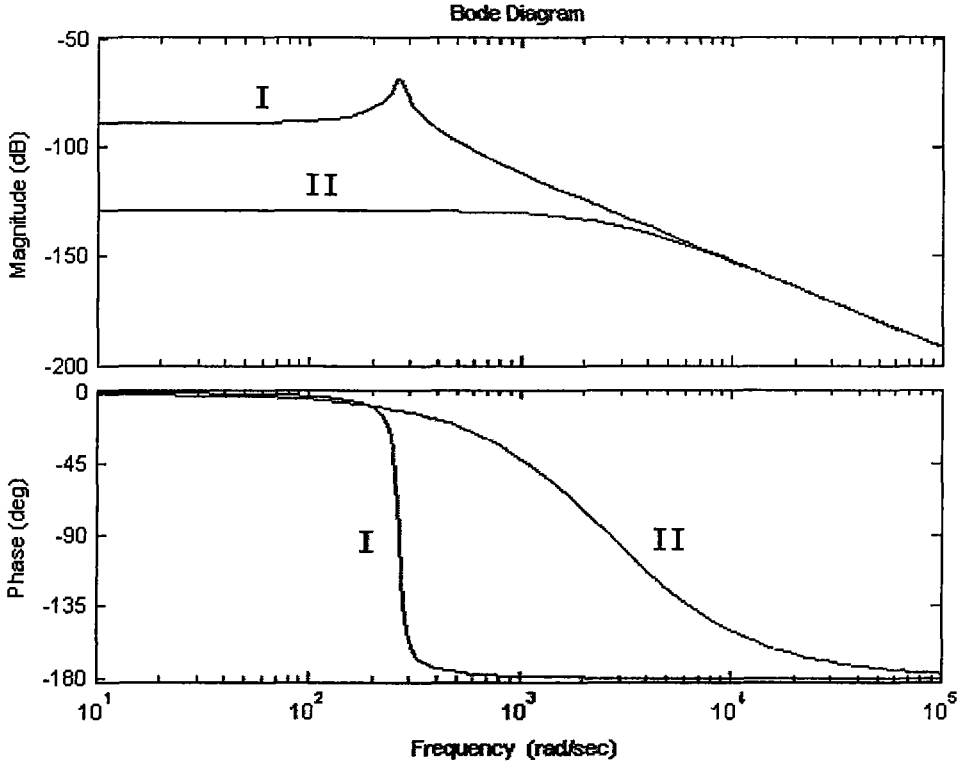


图 4－5　系统的开环（曲线 I）和闭环（曲线 II）频率响应

Figure　4－5　Open (curve I) and closed loop (curve II) frequency response of the system

如图 4－5 给出了系统的开环和闭环频率响应曲线，由图中可以看出，采用闭环控制后，系统在低频段的敏感度降低，稳定性增强。

如图 4－6 给出了采用 PID 控制后的气门升程和误差随时间的变化曲线图，图 4－7 给出了气门运动速度随时间的变化图。由这两图可以看出，采用 PID 控制后，气门基本上能够沿着理想的运动轨迹运动，但是仍然存在一定的误差，而且气门的落座速度比较大，达到 0.72m/s。因此仅仅采用 PID 控制，还不能实现系统在有限时间区间上的完全跟踪问题，并且也不能解决气门的软着陆问题。

另外，PD 控制器对于传感器噪声是非常敏感的，如果系统采用激光位移传感器来反馈位移的变化，则传感器噪声可以忽略不计；如果系统采用价格较便宜的或者不太精确的位移传感器，则 PD 控制的可靠性就会受到影响。

总之，EMVA 系统属于多变量、不容易解耦、含非线性等复杂动态特性的受

多种干扰影响的复杂系统，其控制往往不是常规 PID 控制可以解决的。而将 PID 控制器应用于迭代学习控制系统则有望解决上述一部分系统的控制，从而进一步开拓 PID 控制器的应用潜力。

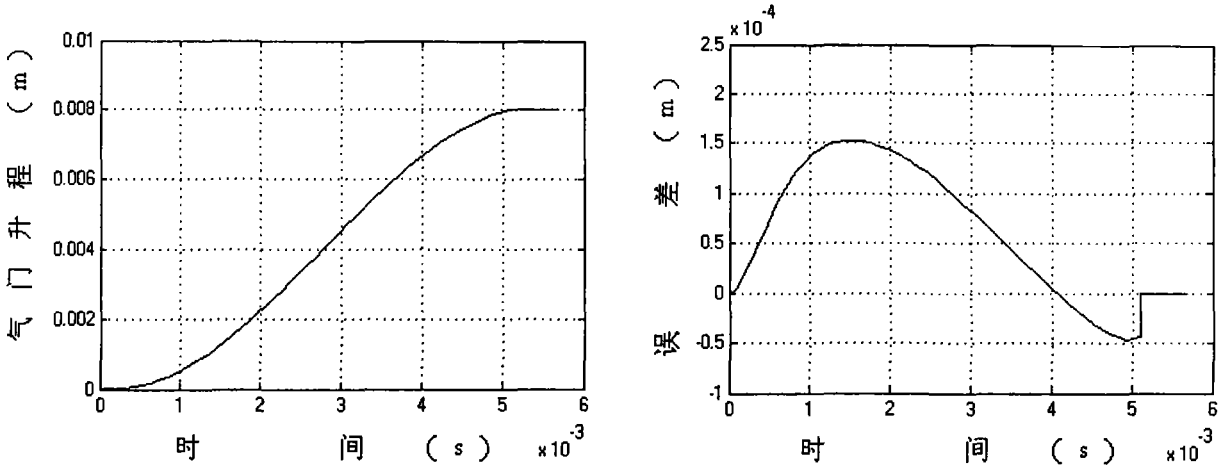


图 4－6　气门升程和误差变化曲线图

Figure　4－6　Variance diagram of valve lift and error

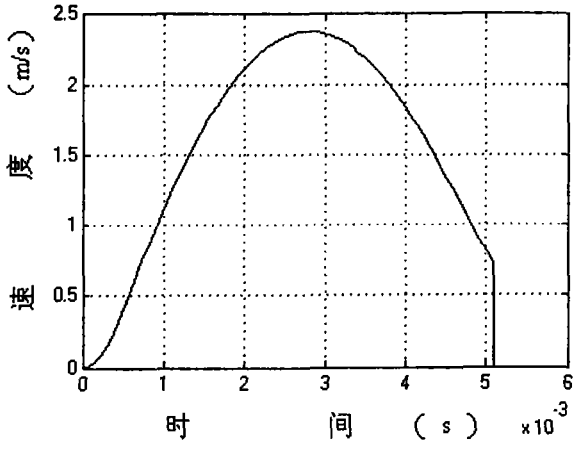


图 4－7　气门的运动速度变化曲线图

Figure　4－7　Variance diagram of valve travel velocity

§4.4　迭代学习控制

4.4.1　迭代学习控制理论概述

在现代控制理论和技术的研究中，让控制器本身具有某种“智能”，使它在控制过程中能不断地完善自己，以使控制效果越来越好。这种具有“学习”能力的

控制器一直是控制工程师们追求的目标。早在二十世纪七十年代，美国华裔学者傅京孙首次系统提出了这种学习控制的概念[64]，从此，有关学习控制的研究一直很活跃。1973 年美国和日本以学习控制和智能控制为题召开了专题讨论会[65]，在七十年代发表了大量有关学习控制和智能控制的文章。在此后的几十年间，学习控制技术随着与其相关的学科及应用领域，如计算机技术、人工智能及神经网络、机器人的发展而发展。目前，学习控制的理论和技术已经成为智能控制领域的一个重要分支。

智能控制大致可分为基于人工智能的和基于数学描述的两大类。前者以专家控制为代表，后者有神经网络控制、基于小脑模型的学习控制及迭代学习控制等。在基于数学描述的智能控制器中又可分为基于参数的和基于品质的两类。前者需要在线辨识被控对象的参数，后者不需要辨识被控对象的参数，而是根据控制的效果，即“品质”来修正控制器。

迭代学习控制（Iterative Learning Control）是智能控制中具有严格数学描述的一个分支，属于基于品质的智能控制方法。它基于前次迭代时的输入输出动态信息，应用学习算法，获得本次迭代控制所需的输入，经过若干次迭代，以期达到在给定的时间区间上实现被控对象以较高的精度跟踪一给定的期望轨迹。ILC 的基本思想最早来自日本学者 Uchiyama[66]，针对高速运动机械手的控制，他提出：不断重复一个轨线的控制尝试，并以此修正控制率，以达到较好的控制效果。在随后的研究中，日本学者 S.Arimoto，S.Kawamura，F.Miyazaki 等人于八十年代初把这种学习控制的思想系统化、理论化，提出了迭代学习控制算法[67]。S.Arimoto 等人的工作在迭代学习控制理论的发展过程中是一个里程碑，为该理论的研究、发展和应用开辟了广阔的前景。这种理论在不精确已知受控对象动力学特性下属于结构简单、在线计算负担小的控制器，由于它属于无模型控制系统综合方法，因此本质上适用于非线性控制系统，采用这种学习控制技术达到的完全跟踪性能优越于其它控制方法。目前迭代学习控制已经在开、闭环学习方法，连续与离散 PID 学习算法的稳定性与收敛性的充分条件，学习控制的鲁棒性等研究上取得了不少的理论结果，并在诸如机器人控制的应用上取得了很大的成功。

根据目前能够检索到的文献可以知道，德国 Siemens 公司的 Wolfgang Hoffmann 等人采用迭代学习控制方法对电磁气门进行了仿真控制，并且取得了令人满意的效果，气门能够跟踪理想的轨迹进行运动，并且使气门落座速度降低到 0.04m/s 之下，在理论上实现了软着陆控制，但是还有待于进一步的试验验证[68]。

4.4.2　迭代学习控制的理论基础[69]

迭代学习控制理论涉及的数学知识比较纷繁复杂，以下仅介绍其中一部分相

关的数学基础。

1. Bellaman-Gronwall 引理

引理 1)：　设 $x(t)$、$c(t)$ 和 $a(t)$ 是 $[0,T]$ 上的实值连续函数，且 $a(t)$ 在 $[0,T]$ 上非负，

如果　　$x(t) \le c(t) + \int_0^t a(\tau)x(\tau)d\tau$　　（$t \in [0,T]$）

那么　　$x(t) \le c(t) + \int_0^t a(\tau)c(\tau)e^{\int_\tau^t a(\sigma)d\sigma}d\tau$　　（$t \in [0,T]$）

另外，如果 $c(t)$ 在 $[0,T]$ 上又是单调非减的，

那么　　$x(t) \le c(t)e^{\int_0^t a(\tau)d\tau}$　　（$t \in [0,T]$）

引理 2)：设 $x(t)$、$y(t)$ 是 $[0,T]$ 上的实值连续函数，$a \ge 0$，

若　　$x(t) \le c + \int_0^t (ax(\tau) + by(\tau))d\tau$

则　　$x(t) \le ce^{at}d\tau + \int_0^t e^{a(t-\tau)}by(\tau)d\tau$

2. 差分不等式

引理 1)：　设非负实序列 $\{a_k\}$ 满足如下差分不等式

$$a_k \le \rho_1 a_{k-1} + \rho_2 a_{k-2} + \cdots + \rho_N a_{k-N} \qquad (k = N+1, N+2, \cdots)$$

它的初始条件为 a_i　$(i = 1,2,\cdots,N)$；　$\rho_i \ge 0 (i = 1,2,\cdots,N)$。如果实系数多项式

$$P(z) = z^N - \rho_1 z^{N-1} - \cdots - \rho_{N-1} z - \rho_N$$

的零点全部位于单位圆内，那么，$\lim_{k\to\infty} a_k = 0$。

引理 2)：设实序列 $\{a_k\}$ 满足差分不等式

$$a_k \le \rho_1 a_{k-1} + \rho_2 a_{k-2} + \cdots + \rho_N a_{k-N} + d_k \qquad (k = N+1, N+2, \cdots)$$

它的初始条件为 a_i　$(i = 1,2,\cdots,N)$，$\{d_k\}$ 为给定实扰动序列，若

$$\rho_i \ge 0 \quad (i = 1,2,\cdots,N), \quad \rho = \sum_{i=1}^{N} \rho_i < 1$$

则　(1)　$d_k \le \overline{d}$，（$\forall k$）蕴涵

$$a_k \le \max\{a_1 + a_2 + \cdots + a_N\} + \frac{\overline{d}}{1-\rho} \qquad \forall k \ge N+1$$

$$\limsup_{k\to\infty} a_k \le \frac{\bar{d}}{1-\rho}$$

（2）$\lim_{k\to\infty} d_k = d_\infty$ 蕴涵　　$\limsup_{k\to\infty} a_k \le \frac{d_\infty}{1-\rho}$

3. λ 范数

向量函数 $h:[0,T]\to R^n$ 的 λ 范数定义为

$$\|h\|_\lambda = \sup_{t\in[0,T]}\left\{e^{-\lambda t}\|h(t)\|\right\} \qquad (\lambda>0)$$

式中 $\|\cdot\|$ 为 R^n 上的一种范数，它具有以下性质：

1）　对于常向量 $c\in R^n$，有 $\|c\|_\lambda = \|c\|$

2）　对于向量函数 $h:[0,T]\to R^n$，有 $\|h\|_\lambda \le \sup_{t\in[0,T]}\|h(t)\| \le e^{\lambda t}\|h\|_\lambda$

4.4.3　迭代学习控制的基本理论及特点

迭代学习控制理论是在研究机械手运行轨迹控制问题背景下逐渐发展起来的。其基本原理如图 4－8 所示，也就是通过对被控系统进行控制尝试，以系统输出 $y(t)$ 与给定轨迹 $y_d(t)$ 的偏差信号修正不理想的控制信号，产生一个新的控制信号 $u(t)$，使得系统跟踪性能得以提高。

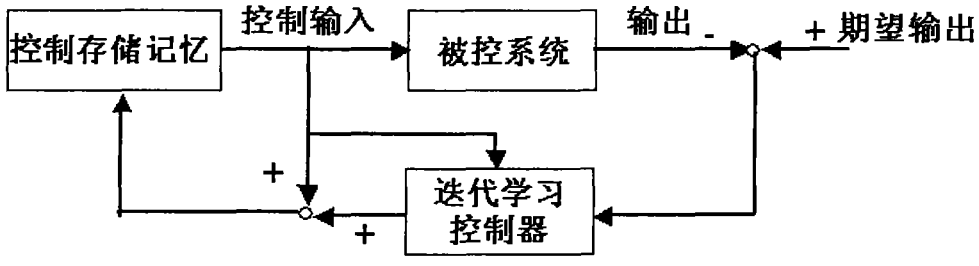


图 4－8　迭代学习控制框图

Figure　4－8　Iterative learning control in block diagram form

迭代学习控制理论可具体从以下几个方面表述：

1. 动力学特性的可重复性

设被控对象的动态过程为：

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=f(t,x(t),u(t))\\ y(t)=g(t,x(t),u(t))\end{cases} \tag{4.16}$$

其中：

$x(t)\in R^n$，　$y(t)\in R^m$，　$u(t)\in R^p$，　f,g 为相应维数的向量函数，其中结构与参数均未知。要求系统在时间 $t\in[0,T]$ 内的输出 $y(t)$ 跟踪 $y_d(t)$。

如果向量函数 f,g 在每一次重复运行时所表示的函数关系不变，则称由它们描述的系统动力学特性（4.16）具有可重复性。以 $k=0,1,2,\cdots$ 表示重复操作次数，并以 $x_k(t)$、$u_k(t)$、$y_k(t)$ 分别为第 k 次重复时系统的状态向量、控制向量和输出向量，那么，可重复的控制系统（4.16）可以表示为：

$$\begin{cases}\dot{x}_k(t)=f(t,x_k(t),u_k(t))\\ y_k(t)=g(t,x_k(t),u_k(t))\end{cases} \tag{4.17}$$

2. 跟踪任务

在有限时间区间 $[0,T]$ 上，给定可达的期望轨迹 $y_d(t)$（$t\in[0,T]$）和相应的期望初态 $x_d(0)$。这里期望轨迹 $y_d(t)$ 的可达性是指以 $x_d(0)$ 为初态的被控对象存在控制 $u_d(t)$（$t\in[0,T]$），在该控制作用下产生相应于期望轨迹 $y_d(t)$ 的状态轨迹 $x_d(t)$（$t\in[0,T]$）。这里 $u_d(t)$（$t\in[0,T]$），$x_d(t)$（$t\in[0,T]$）分别称为期望控制和期望状态。

3. 初始定位

自 $t=0$ 时刻起，系统的每一次重复操作须从某初始点开始进行。这里初始点是指初始状态 $x_k(0)$ 或初始输出 $y_k(0)$。因此，在每一次迭代开始前须进行初始定位操作，初始点的设置须满足初始条件，所谓初始条件是指在每次迭代时为保证迭代收敛性，对于系统初始点的重复定位操作所限定的条件。目前在迭代学习控制系统的收敛性分析中，常见的初始条件有：

1）　迭代状态与期望初态一致，即 $x_k(0)=x_d(0)$（$k=0,1,2,\cdots$），这时称初态是严格重复的。

2）　迭代初态固定，即 $x_k(0)=x^0$（$k=0,1,2,\cdots$），x^0 为某给定初态，它与期望初态 $x_d(0)$ 不一致，这时称初态是重复的。

对于正则系统而言，初始条件 1）与初始条件 2）是等价的；对于非正则系统，初始条件 2）比初始条件 1）更容易实现，因为它只要求在每一次迭代时将初态固定于一定即可。

4. 学习律

定义输出误差为：

$$e_k(t)=y_d(t)-y_k(t) \tag{4.18}$$

由当前控制 $u_k(t)$ 和输出误差 $e_k(t)$ 构成学习律，产生下一次迭代时的控制 $u_{k+1}(t)$：

$$u_{k+1}(t)=u_k(t)+U(e_k(t),t) \tag{4.19}$$

式中U为给定映射，大多取为线性函数；也常常取初始控制输入$u_0(t)=0$（$t\in[0,T]$）。学习律的常见形式有：

D 型学习律：

$$u_{k+1}(t)=u_k(t)+\Gamma\dot{e}_k(t) \tag{4.20}$$

P 型学习律：

$$u_{k+1}(t)=u_k(t)+Le_k(t) \tag{4.21}$$

组合型学习律（PD 型、PI 型、PID 型学习律）：

$$u_{k+1}(t)=u_k(t)+\Gamma\dot{e}_k(t)+Le_k(t)+\Psi\int_0 e_k(\tau)d\tau \tag{4.22}$$

式中Γ、L、Ψ为定常增益矩阵。

5. 停止条件

在每一次重复操作结束时，需要检验停止条件，若停止条件成立，则停止迭代运行，常见的停止条件为：

$$\|y_d(t)-y_k(t)\|<\varepsilon \qquad (t\in[0,T]) \tag{4.23}$$

式中ε为给定的允许跟踪精度。另外，停止条件也可以通过限定最大迭代次数给出。

6. 稳定性与鲁棒性

实际的重复定位操作会导致迭代学习控制系统存在初态偏移，如果这种偏移是随机性的，那么初始条件 1）和初始条件 2）都不能成立。另外，不具有可重复性的状态扰动和量测噪声也使得系统动力学特性变得不完全可重复。这样在理想的情况下被证明是收敛的系统不能保证在非理想情况下也是收敛的。迭代学习控制系统的稳定性与鲁棒性问题最早是由 Arimoto 及其合作者提出的[70]。稳定性问题讨论初态偏移对系统跟踪性能的影响，而鲁棒性问题则是比稳定性问题更广泛的一类问题，它不仅讨论初态偏移，而且也讨论状态扰动、量测噪声、输入扰动、期望轨迹变动以及学习区间偏移等各种干扰对系统跟踪性能的影响。因此，鲁棒性是指系统初态偏移稳定性和干扰抑制有界性的不变性质，

由鲁棒性分析可知，只有当系统初态满足条件 1），状态扰动和量测噪声被消除时，才能保证算法收敛性。实际上，算法收敛性所要求的初始条件和干扰条件是可以放松的，我们称初态不满足初始条件 1）以及扰动不为零情形下收敛的迭代学习控制系统是鲁棒收敛的。文献[71]和[72]分别讨论了存在周期状态扰动和输入扰动时的算法收敛性。

6. 分析手段

迭代学习控制系统的收敛性分析大多是在λ范数意义下给出的，即对于某充

分大的λ，依λ范数的单调性成立：

$$\|e_{k+1}(t)\|_\lambda \le \rho \|e_k(t)\|_\lambda \tag{4.24}$$

这里$\rho \in [0,1)$，它意味着：

$$\sup_{t\in[0,T]} \left\{ e^{-\lambda T} \|e_k(t)\| \right\} \to 0$$

由于 $$\sup_{t\in[0,T]} \|e_k(t)\| \le e^{\lambda T} \|e_k\|_\lambda$$

故依λ范数的收敛性蕴涵依R^m上（$e_k(t) \in R^m$）任意范数的收敛性。但是，输出误差依λ范数的单调性并不能保证依R^m上其它范数的单调性。

迭代学习控制的特点：

(1)采用"在重复中学习"的学习策略，具有记忆系统和经验修正机制；

(2)适合于具有某种重复运动性质的被控对象；

(3)实现有限区间上的完全跟踪，这不同于渐近跟踪；

(4)适用于不精确已知（甚至未知）被控对象特性的非线性系统；

(5)在线计算负担小，适合于快速运动控制；

(6)具有记忆功能，在遇到类似控制任务时，能根据记忆系统中的信息迅速调整控制信号。

4.4.4 反馈－前馈迭代学习控制

当控制器使用开环学习律时，迭代学习控制系统为开环系统，这时控制器对被控对象无镇定作用[67]；当控制器使用闭环学习律时，往往需要高增益反馈。但对于一些含饱和执行器的系统，高增益反馈会产生过大的控制信号。由于饱和执行器的限幅作用，学习控制系统的收敛速度会受到影响，因而高增益反馈失去意义。显然，对开环迭代学习控制系统引入一反馈环，构成反馈－前馈迭代学习控制系统是提高系统跟踪性能的有效途径[73]。反馈－前馈迭代学习控制系统的控制器由反馈控制器和前馈控制器两部分构成，它使用开闭环配合的学习律。反馈控制器主要用于实现系统镇定任务，它使得系统输出不偏离期望轨迹太远，在反馈控制器的镇定作用下，前馈控制器可期望快速实现完全跟踪任务。

设反馈控制器为：

$$u_{fb,k}(t) = h_{fb}(e_k(t)) \tag{4.25}$$

前馈控制器采用开环学习律：

$$u_{ff,k+1}(t) = u_{ff,k}(t) + h_{ff}(e_k(t)) \tag{4.26}$$

这时系统的控制输入可以写成：

$$u_{k+1}(t)=u_{ff,k+1}(t)+u_{fb,k+1}(t)$$
$$=u_{ff,k}(t)+h_{ff}(e_k(t))+h_{fb}(e_{k+1}(t)) \quad (4.27)$$

图 4－9 给出了采用这种反馈－前馈迭代学习控制算法的系统结构图。

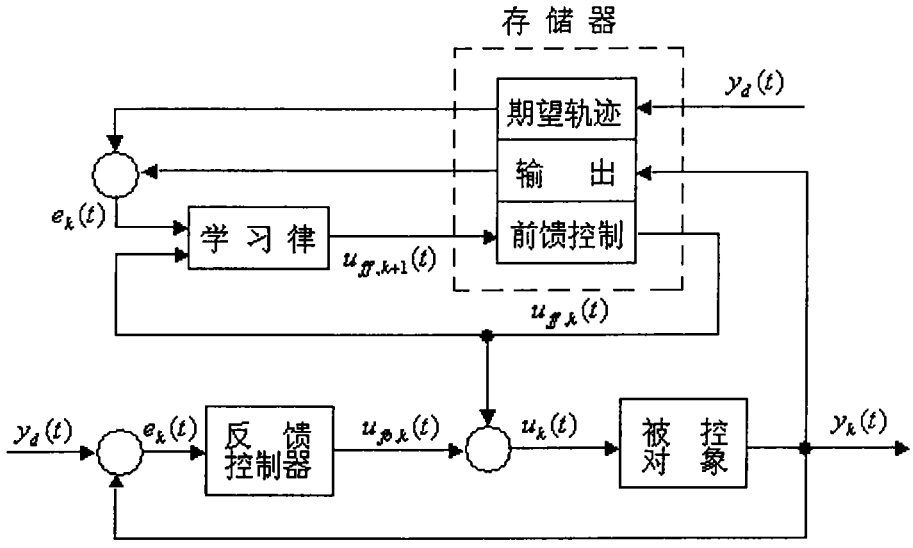


图 4－9　反馈－前馈迭代学习控制算法

Figure　4－9　Feedback-Feedforward Iterative learning control algorithm

4.4.5　反馈－前馈迭代学习控制的实现

由于迭代学习控制的上述优点，我们对电磁全可变气门这种强耦合、高度非线性的复杂动态系统采用反馈－前馈迭代学习控制方法。因为实际运行的迭代学习控制系统存在量测噪声，所以直接的做法就是对量测信号进行滤波处理，然后使用滤波后的信号构造学习律。文献[74] 采用了一种 Q－滤波器用来增强迭代学习控制的鲁棒性，Q－滤波器是一个具有零相位特征值的动态均值，将它用在迭代学习控制器中可以产生均值前馈迭代控制信号：

$$w_{ave}(t)=Q(s)w(t) \quad (4.28)$$

均值 Q－滤波器的离散化形式 $Q(z)$ 可以用下式来表示：

$$Q(z)=\frac{\gamma_0+\gamma_1(z^{-1}+z^{1})+\ldots+\gamma_p(z^{-p}+z^{p})}{\gamma_0+2\gamma_1+\ldots+2\gamma_p} \quad (4.29)$$

式中系数 γ_i 是根据 Gaussian 分布得来的：

$$\gamma(x)=\frac{\exp^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{\sigma})^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \tag{4.30}$$

Gaussian 分布的宽度是通过σ的值来控制的，在仿真计算中参考文献[13]，取$\sigma=0.04$。

通过使用加权平均值$w(t)$，可以消除由于高频扰动而造成的误差，从而使系统的动力学特性更加稳定。

如图 4－10 给出了 EMVA 机构的反馈－前馈迭代学习控制框图。

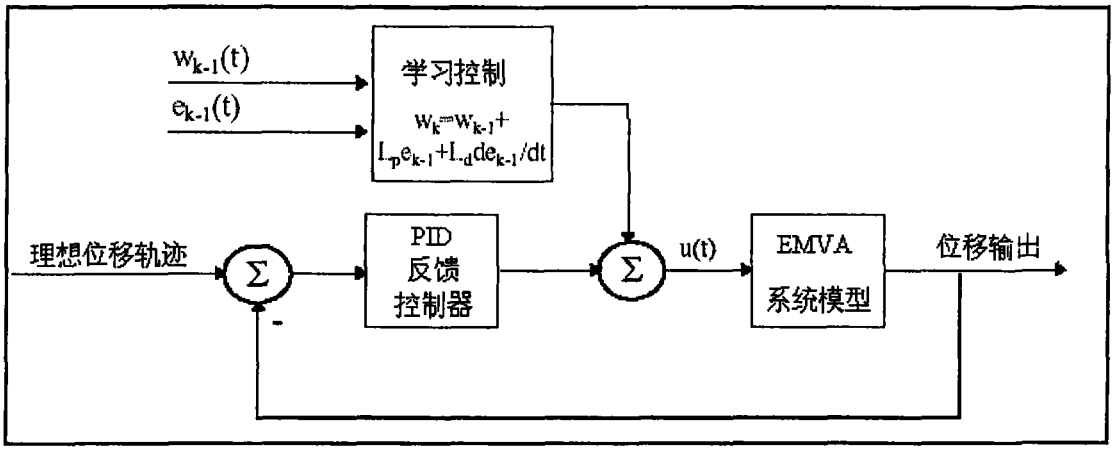


图 4－10　EMVA 机构的反馈－前馈迭代学习控制框图

Figure 4－10　Feedback-Feedforward Iterative learning control block diagram of EMVA

图中 EMVA 机构的非线性系统模型的状态方程为：

$$\begin{aligned}
&\frac{dY}{dt}=V\\
&\frac{dV}{dt}=\frac{F_{mag1}}{m}-\frac{F_{mag2}}{m}-\frac{K}{m}Y-\frac{K_f}{m}V\\
&\frac{d\Psi_1}{dt}=U_1-R\cdot I_1\\
&\frac{d\Psi_2}{dt}=U_2-R\cdot I_2
\end{aligned} \tag{4.31}$$

式中：　Y——气门位移（m）；　　V——气门运动速度（m/s）；

K——弹簧刚度（N/m）；　K_f——阻尼系数（$N/(m/s)$）；

F_{mag1}、F_{mag2}——上、下电磁铁的电磁力（N）；

Ψ_1、Ψ_2——上、下电磁线圈的磁链（Wb）；

U_1、U_2 ——上、下电磁线圈的电压（V）；

I_1、I_2 —— 上、下电磁线圈的电流（A）。

式中各参数的选择与第三章中的仿真计算相同。

反馈部分仍然采用前面 PID 控制中使用的 PD 控制：

$$u_{PD}(t)=K_p e(t)+K_d\frac{de(t)}{dt}$$

前馈部分：

$$w_k(t)=w_{ave(k-1)}(t)+L_p e_{k-1}(t)+L_d de_{k-1}(t)/dt$$

式中：

$$w_{ave}(t)=Q(z)w(t)$$

将反馈和前馈控制器结合起来，可以得到如下控制输入：

$$u(t)=u_{PD}(t)+w_{ave(k)}(t)$$

反馈－前馈学习控制中的增益是通过仿真计算，反复迭代试凑确定的（$K_P=-600, K_D=-80, L_P=-5000$，$L_d=-300$），确定的原则是既要使系统保持稳定，又要使误差能够收敛。

EMVA 机构的反馈－前馈迭代学习控制是利用 MATLAB/SIMULINK 软件进行仿真计算的，如图 4－11 给出了程序的流程图。

4.4.6　仿真计算结果的分析

如图 4－12 给出了气门位移、位移误差以及控制电压随时间的变化曲线图（k＝1 时为第 1 次迭代，k＝10 时为第 10 次迭代，...）。由图中可以看出，随着迭代次数的增加，在学习律的修正作用下，位移误差不断减小，气门运动轨迹向期望轨迹不断靠近。

如图 4－13 给出了气门的落座速度以及气门由开启到关闭（关闭到开启）的过渡过程时间随迭代次数增加的变化曲线图。由图中可以看出，随着迭代次数的增加，气门的落座速度不断减小，由 0.58m/s 减小到 0.08m/s；气门运动的过渡时间也不断缩短，由 5.6ms 减少到 5.0ms。因此，采用反馈－前馈迭代学习控制方法，在忽略燃气阻力扰动的情况下，能够实现气门的快速启闭和软着陆的工作要求。

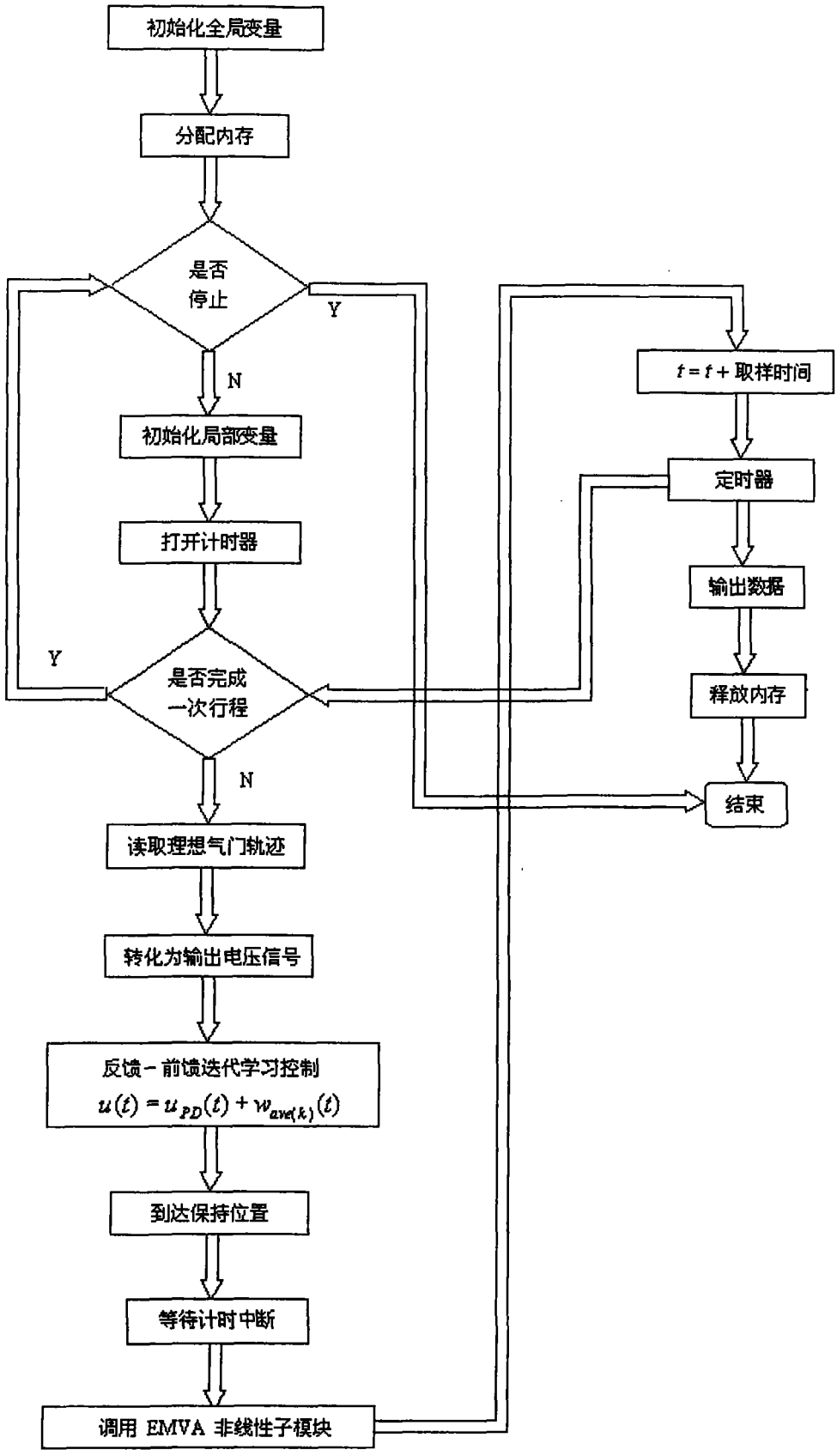


图 4－11　反馈－前馈迭代学习控制流程图

Figure 4－11　Feedback-Feedforward Iterative learning control flow chart

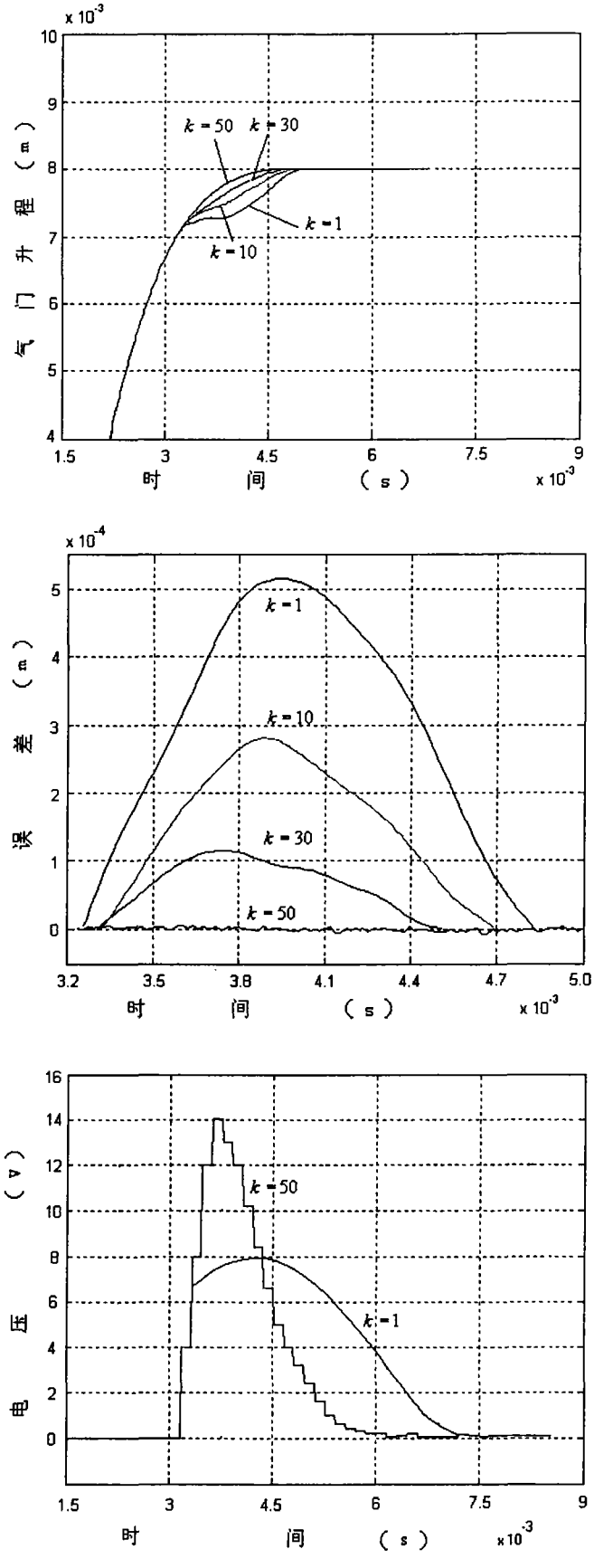


图 4－12　　气门位移、位移误差以及控制电压随时间的变化曲线图

Figure 4－12　Variance diagram of valve path, path error and control voltage

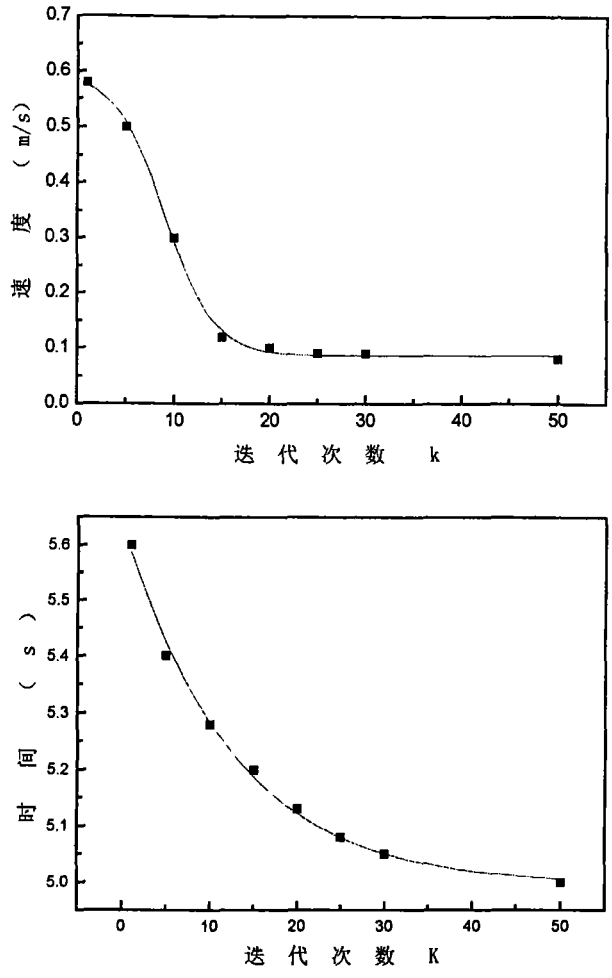


图 4－13　气门落座速度以及过渡过程时间随迭代次数的变化图

Figure 4－13　Variance of travel interval and contact velocity with the learning cycle number

采用仿真计算可以得到如图 4－14 所示的气门升程、速度随时间变化的曲线图，但是如果仅采用开环控制，则仿真曲线很快就会发生振荡，不能保持稳定的波形，而采用反馈－前馈迭代学习控制方法后，气门的升程、速度曲线就能够保持理想波形稳定输出。图 4－15 给出了气门流通截面积随曲轴转角的变化图。由仿真曲线可以看出，传统配气机构气门升程的开启和关闭是一个渐进的过程，受凸轮型线和配气机构几何尺寸的限制，其流通截面较小，直接影响充气效率。与此相比，电磁驱动可变气门的运动是可以随发动机工况全程控制的，开启和关闭气门的时间只占气门开启持续期的一小部分。气门升程随曲轴转角的变化接近一梯形。这种进气气门开启历程，使气门保持最大升程时间占整个开启时间的大部分，保证了较高的充气效率，有利于提高发动机的动力性、经济性以及排放的改善。

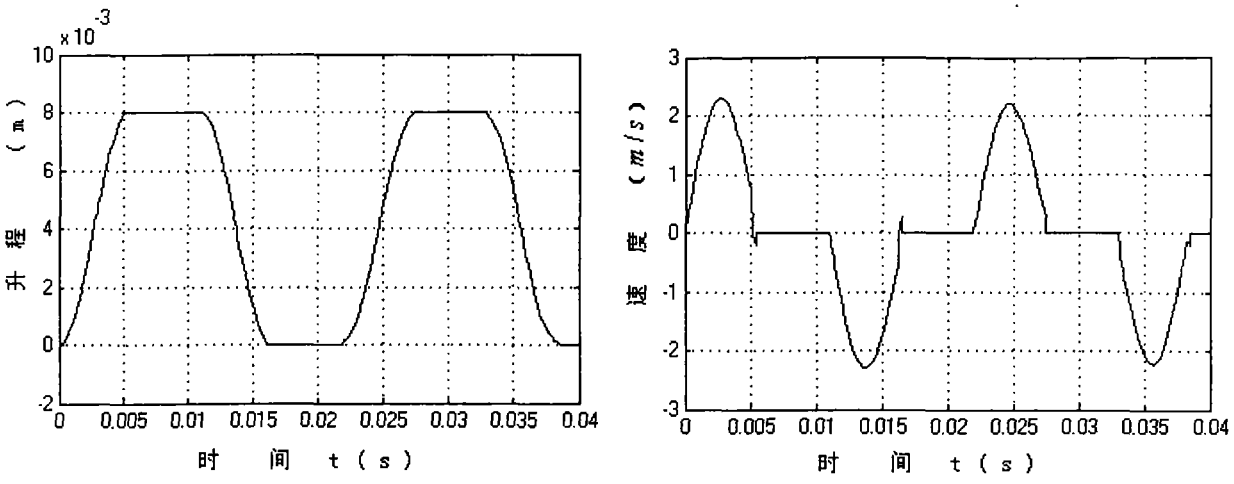


图 4－14　气门的升程和速度随时间的变化图

Figure 4－14　Variance diagram of valve lift and velocity

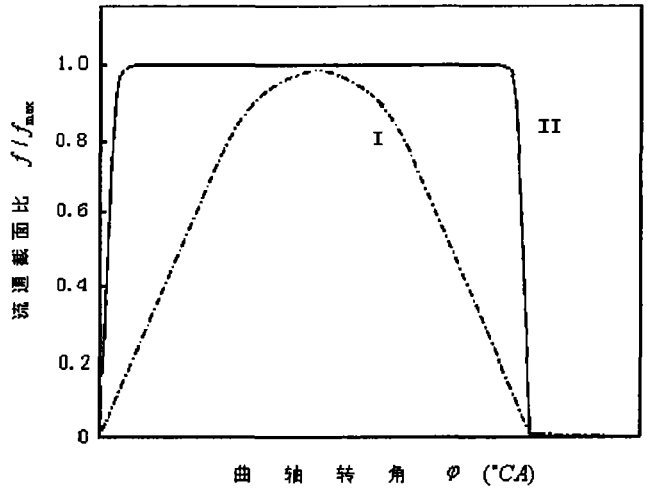


图 4－15　气门流通截面积随曲轴转角的变化图（其中 I 为凸轮驱动气门，II 为电磁气门）

Figure 4－15　Variance of the valve flowing sectional area with the crank angle

本章小节

本章在第三章建立的 EMVA 机构数学模型的基础上，设计了针对该强耦合的非线性系统的 PID 控制和反馈－前馈迭代学习控制。仿真计算结果表明，在进行电磁气门的快速精确的位移输出和软着陆控制方面，采用反馈－前馈迭代学习控制要比 PID 控制方法具有明显的优越性。

第五章 EMVA控制系统的硬件及软件设计

本章的主要内容：

电控单元硬件及软件设计是EMVA电控系统的核心，它完成各种参数的采集、各种控制算法的计算及控制量的输出等。电控单元硬件及软件设计的合理性在很大程度上决定了电控系统的可靠性和功能。本章研究开发了EMVA电控系统的试验装置，包括ECU的硬件及软件设计、驱动电路的设计等。

§5.1 EMVA控制系统概述

EMVA控制系统包括硬件和软件两部分。硬件有电控单元ECU（Electronic Control Unit）及其接口、执行机构、传感器等；软件存储在ECU中，支配控制系统完成实时测控功能，包括各种数据采集、计算处理、系统监控及自诊断等。围绕单片机设计组织的ECU是整个系统的核心，并随着微电子技术的迅速发展其功能也不断增强，逐渐由单一控制向集中控制方向发展。

由于EMVA机构在国外尚处于研究开发或装车试用阶段，还没有进入实用化的批量生产阶段，因此没有成熟的控制方法可供借鉴。目前美国FORD公司的EMVA控制系统采用的主要是dSPACE公司生产的数字信号处理板，它的软、硬件可以完成数据采集和实时控制的各种功能，并且可以通过自带的I/O口和PC机进行实时交互处理。控制策略用MATLAB的SIMULINK编制成程序以后，可以通过PC机下载到数字信号处理板的一个独立的处理器上，然后这个处理器就可以脱离PC机进行独立运行，完成控制功能[51]。

目前国内对电磁全可变气门的控制研究才刚刚起步，由于我们现在对EMVA的研究还处于探索性的理论研究阶段，并且鉴于时间和经费的关系，我们无法购置dSPACE数字信号处理板，因此采用PC机、仿真器和外围处理电路组合在一起的硬件设计方案无疑是比较合理的选择。实践证明，在EMVA结构本身处在试探性研究的时候，基于PC机的控制系统具有开发周期短、可靠性高、兼容性好、便于修改维护等优点。

5.1.1 电控单元（ECU）的现状

ECU的基本体系结构由输入电路、微处理器、输出电路和电源电路等组成。其中，微处理器是ECU的核心部件。早期的ECU采用8位和16位微处理器，近

几年也有部分采用 32 位的。由于微处理器的速度越来越快，ECU 也由早期的单机控制向集中控制迅速发展，ECU 的可靠性也大幅度提高。目前用的 CPU 主要有 INTEL 公司和 MOTOROLA 公司的 16 位和 32 位单片机，它们特别适用于在复杂的控制系统中使用，具有速度快、功能强等特点[75]。

在 ECU 的设计和开发方面，目前已经进入模块化设计阶段。世界各大发动机厂商都相应的建立了一些设计规范和规程，来指导 ECU 的开发，具体包括系统需求模型设计、系统结构模型设计、系统硬件设计、系统软件设计和系统集成测试。

在 ECU 的控制程序设计上，主要由监控、管理、计算、控制、检测和自诊断等部分组成。控制方法多种多样，除了应用最多的基于经典控制理论 PID 控制模型，目前最优控制、自适应、自学习、模糊控制等也开始被应用到发动机电控上来[76,77,78]。但这些控制模型主要应用在电控燃油喷射系统上，由于可变气门技术尤其是电磁控制全可变气门技术研究起步时间较晚，再加上 EMVA 系统是一个强非线性系统，所以目前还没有成熟的，可以广泛推广的由理论方法推导的数学模型。在我国，ECU 程序的开发起步较晚，大多尚处在用汇编语言各自独立编写的阶段，效率很低。

5.1.2 电控单元（ECU）的发展方向

（1） 电子系统综合化

为了使汽车各个控制系统，比如发动机全可变气门控制、燃油喷射控制、动力传动总成控制、底盘控制、车身控制、信息与通讯控制等系统的功能达到最优协调与匹配，减少传感器的使用数量，需要通过数据总线将各个 ECU 连接在一起，形成汽车电子综合控制系统。这种系统实际上是一个分布式计算机网络，虽然各个 ECU 基本上进行独立控制，完成各自的特定功能，但通过数据总线相互通讯来共享信息和资源。不仅降低了成本，而且可以产生许多新的控制功能。汽车控制系统中所用的许多信号和数据，如发动机转速、油门位置信号等都可供多个 ECU 使用，从而可以增加整个汽车电子系统的一致性。

（2）电子系统设计的集成化和自动化

电子系统的集成化，不仅可使系统的体积小、重量轻且功耗低，更重要的是可使系统的可靠性大大提高。因此自集成电路问世以来，集成规模便以每 6 年 10 倍的速度增长。1999 年，以 0.18 μm 工艺为基础的百万门器件已经出现，预计在 2005 年，集成工艺将达到 0.1 μm。深亚微米半导体工艺、B 表面安装技术的发展又支持了产品集成化程度的进步，使电子产品进入了片上系统（System On Chip）

时代，也就是将电路设计、系统设计、硬件设计、软件设计和体系结构设计集合于一体，来实现对汽车多个控制系统的集中控制，这样复杂的设计通常需要很多人、经过多年的研究开发才能实现。[79, 80]

电子设计自动化可以根据设计要求，以自顶至底的方式设计，并相应地完成系统描述、仿真、集成和验证等环节，在以上过程中，除系统设计和对功能的描述以外均可由计算机自动完成，这样就可以提高设计效率，减少复杂的工序，缩短开发周期。这个变化是伴随着片上系统的设计出现的，因此有人将电子设计转向片上系统看做是一次关于系统设计的革命。[79]

对于汽车电子控制系统而言，已经出现了只含有 5 个处理单元的大规模集成电路芯片，即包括动力传动总成控制、底盘控制、车身控制、信息与通讯控制以及专为系统冗余设计的后备控制处理器等控制结构，每个处理单元上都有独立的 ROM 与 RAM 和各自的控制功能模块。随着电子设计技术的飞速发展，汽车电子控制系统将会越来越集成化、专业化和智能化。[81]

§5.2 EMVA 控制系统的组成

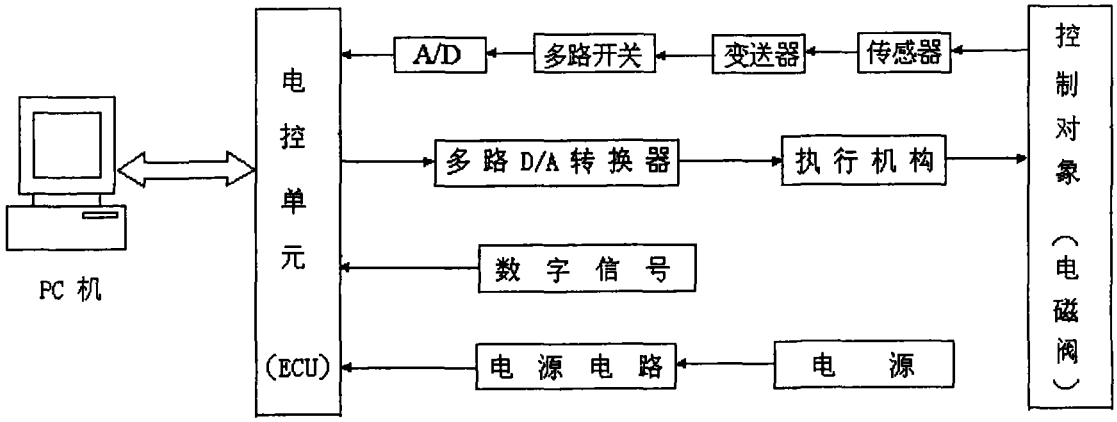


图 5－1　ECU 控制系统的组成

Figure 5－1　Component of ECU control system

EMVA 控制系统包括硬件和软件两部分。硬件由 ECU、PC 机、接口电路及外部设备等组成，如图 5-1 所示。控制对象（电磁阀）的被测参数经传感器、变送器，转换成统一的标准信号，再经 A/D 转换器进行模拟/数字转换，转换后的数字量经接口送入 ECU，这是模拟量输入通道。除此之外，有些被测参数为数字信号，它们可通过接口直接加至 ECU。

软件存储在 ECU 中，对于电控系统来说，主要包括开发软件和应用软件两大类。开发软件仅在开发控制系统时使用，包括各种语言处理程序（如汇编程序、编译程序）、调试和仿真程序等。应用软件是面向用户本身的程序，如控制系统中各种数/模、模/数转换程序、数据采样滤波、计算处理以及各种控制算法等。

（1）电控单元（ECU）

ECU 是控制系统的核心部件，负责信号处理、设置、计算、控制和中断服务等。ECU 首先完成传感器信号的 A/D 转换、周期脉冲信号的测量和其它信号的输入处理，然后计算并控制所需要的输出值，并按要求向执行机构发送控制信号。

（2） 输入通道

ECU 的输入信号主要有三种，即模拟信号、数字信号和脉冲信号。模拟信号必须通过 A/D 转换后才能为 CPU 处理。由于控制系统往往要求模数型信号转换具有较高的精度和分辨率，通常采样采用 10 位以上的 A/D 转换器。

（3）输出通道

输出信号被用作控制电磁阀的电流信号和指示灯的开/关信号，一般需要将 ECU 的控制信号通过输出通道处理后再驱动执行机构，来控制整个系统的运行。

§5.3　EMVA 控制系统的硬件设计

5.3.1 EMVA 控制系统总体设计

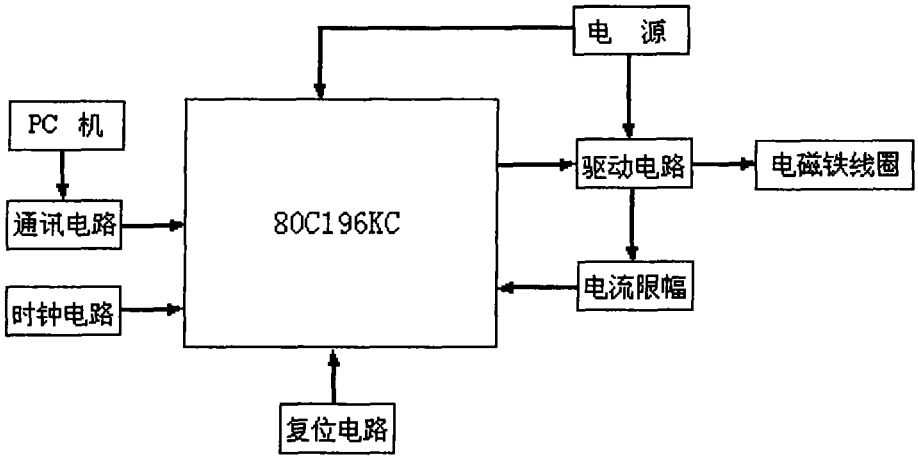


图 5-2　EMVA 实验系统的硬件结构整体框图

Figure 5－2　Hardware architecture diagram of EMVA test system

本控制系统的硬件应该完成下列任务：

1） 控制线圈的电流变化；

2） 检测过载运行状态；

3） 与主机（PC 机）进行双向通信。

图 5-2 为 EMVA 机构的硬件系统结构图，各部分功能简述如下。

1. CPU

80C196 是 Intel 公司继 8096 之后推出的一系列高性能的 CHMOS 16 位单片机。CHMOS 芯片耗电少，除正常工作外，还可工作于 2 种节电方式：待机方式和掉电方式，进一步减少了芯片的功耗。

80C196KC 是 CHMOS 中的第二代产品，与 8096 系列单片机相比，主要的特点是

1） 芯片内增加了外设事务服务器（PTS），大大提高了响应外设中断的速度，减少了 CPU 在处理外设事务上的开销。

2） 增加了可以支持若干种标准同步串行传输协议的同步串行口，以及适用于主从机通讯的从口（Slave Port），使得主机可以把从机当作一个存储器映射的外设器件来访问。

3） 提高了 A/D 转换器的性能，10 位 8 通道 A/D 转换，且转换时间和精度可控（8bit/10bit）。

4） 除正常中断源外，还提供 15 级 PTS 外围事件服务器中断功能，极大地提高了单片机的效率。

5） 增加了 PWM 的通道数，具有 3 个 PWM 通道。

2. 仿真器

研制单片机应用产品，如果缺少开发工具，效率将很低。因此我们选用了南京伟福公司生产的 E2000/L 型仿真器。它具有以下显著特点：

1） 双工作模式：软件模拟仿真，硬件仿真。

2） 双 CPU 结构，100% 不占用户资源：全空间硬件断点，不受任何条件限制，支持地址、数据、外部信号、事件断点、支持实时断点计数、软件运行时间统计。

3） 双集成环境：编辑、编译、下载、调试全部集中在一个环境下；多种仿真器，多类 CPU 仿真全部集成在一个环境下。

4） 强大的逻辑分析仪综合调试功能：逻辑分析仪由交互式软件菜单窗口对系统硬件的逻辑或进序进行同步实时采样，并实时在线调试分析，采集深度 32K，

最高时基采样频率达 20M，40 路波形可精确实时反映用户程序运行时的历史时间。系统在使用逻辑分析仪时，除普通的单步运行、键盘断点运行、全速硬件断点运行外，还可实现各种条件组合断点如：数据、地址、外部控制信号、CPU 内部控制信号、程序区间断点等。

5） 通过 RS—232 串行口与 PC 机联机，在仿真系统软件支持下，所有汇编链接和调试等过程均在 PC 机环境下进行，简捷高效。

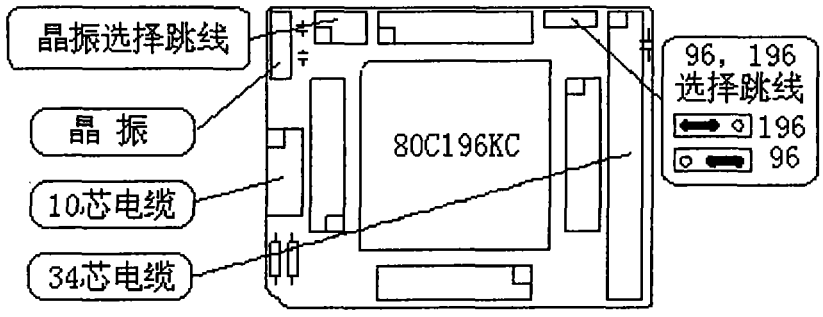


图 5-3　POD196KB/KC 仿真头

Figure 5—3　POD196KB/KC

图 5-3 给出了用于仿真 INTEL80C196KC 单片机的仿真头的示意图。图 5-4 给出了 E2000/L 仿真器与 POD196KC 仿真头的连接示意图。

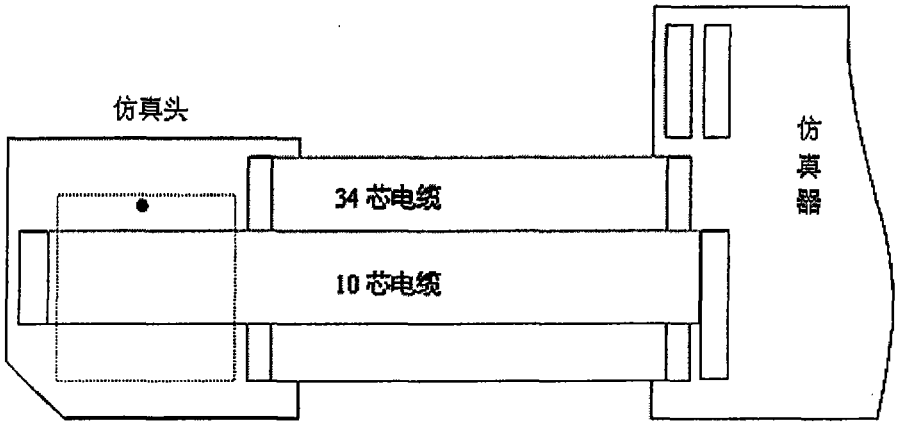


图 5-4　E2000/L 仿真器与 POD196KC 连接图

Figure 5—4　Connection diagram of E2000/L simulator and POD196KC

3. 电源

系统用电需要通过 220V 交流电源和汽车蓄电池两种方式同时供电，电控单

元所需电源有：+12V 驱动电源，+5V 逻辑电路供电。220V 交流电源用来供给 PC 机，汽车蓄电池用来供给驱动电路。

5.3.2 电磁全可变气门的功率驱动电路设计

功率驱动模块决定着电磁气门的能量输入方式，对电磁气门的动态工作过程影响很大。在电磁气门由开启向关闭的运动过程中，功率驱动模块应以尽可能高的速率为上部电磁铁注入能量，使其产生足够大的电磁作用力，缩短响应时间。在电磁气门的闭合状态，因其工作间隙较小，磁路磁阻很低，电磁线圈通入较小的保持电流便能产生足够大的电磁作用力保证电磁阀的可靠闭合。小的保持电流还可以降低能量消耗，减小线圈发热，同时有利于电磁气门的快速开启。在电磁气门刚刚开启时，应使上部电磁线圈中储存的能量迅速卸掉，线圈电流瞬时切断，使气门能在弹簧的作用下迅速开启。

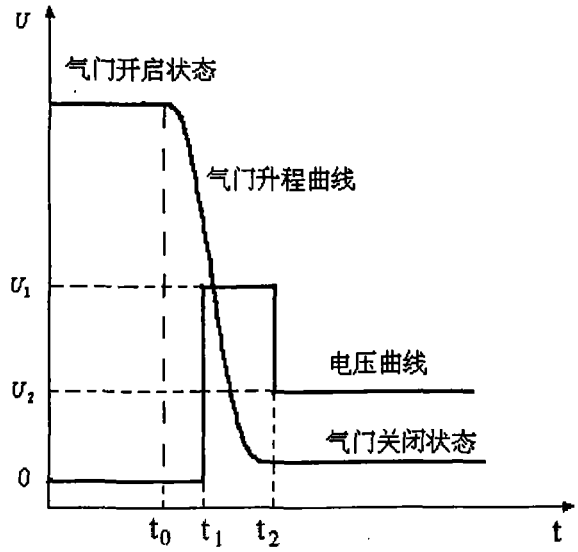


图 5-5 电磁气门驱动电压变化规律

Figure 5－5　Changing laws for driving voltage of EMVA

因此，为实现电磁气门关闭过程的大电流强激和闭合后的小电流维持，功率驱动模块应该为电磁气门机构提供如图 5-5 所示的驱动电压形式。在电磁气门刚刚开启时不施加电压以节约电能，然后迅速施加高的驱动电压U_1，提供较高的峰值电流；闭合后施加低驱动电压U_2，提供维持电流。

综上所述，电磁全可变气门系统中的驱动电路应具有如下特性：

(1) 电流应具有很快的动态响应速度，这是影响系统响应速度的一个关键的外部因

素；

(2)有过流保护或限流功能，以免电磁铁的线圈过热；

(3)电流可调；

(4)良好的抗干扰能力。

为满足上述要求，作者设计了脉宽调制式驱动电路。脉宽调制（PWM）就是重复通/断开关，把直流电压（电流）变换为高频方波电压(电流)，再经整流平滑变为直流电压输出。它是单片机上常用的模拟量输出方法，通过外接的转换电路，可以将脉冲的占空比变成电压。程序中通过调整占空比来输出模拟电压。占空比就是脉冲中高电平与低电平的宽度比。

PWM 变换器对负载没有限制，电压与电流峰值较低，工作状态分析简单，改变占空比可以控制输出电压，得到理想的电流值。而且驱动电路中的大功率晶体管和功率电阻的数量可以最大限度地减少，是一种既结构简单又节约能耗的方案。

5.3.2.1 脉宽调制（PWM）式驱动电路的研制

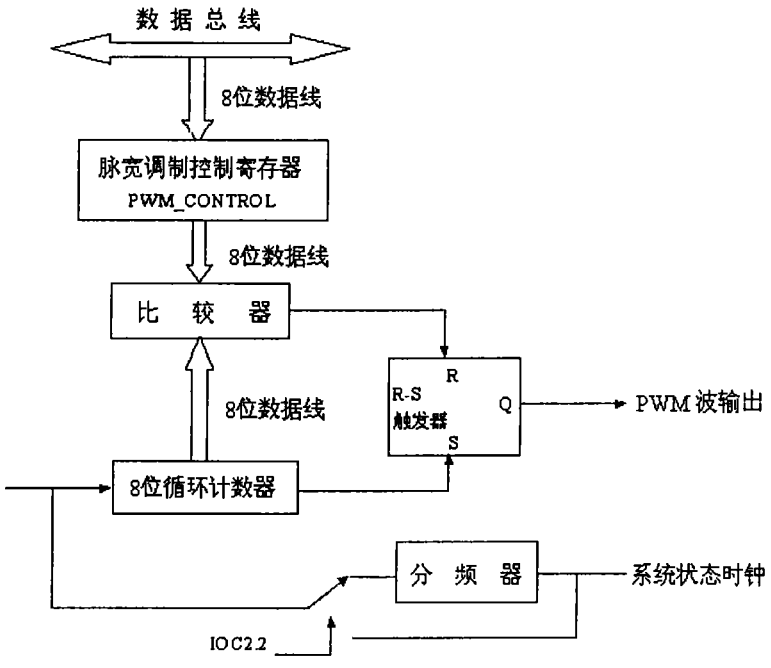


图 5-6　PWM 波发生器

Figure 5－6　PWM generator

1. PWM 波发生器及其工作原理

80C196KC 单片机的 PWM 波发生器的硬件电路主要由脉冲宽度调制寄存器 PWM_CONTROL、8 位循环计数器、分频器、比较器和 R-S 触发器等组成，其结构框图如图 5-6 所示[82]。

（1） 只要单片机上电，8 位循环计数器即开始工作。每接收一个脉冲，便计数一次，当其内容为 0FFH 再加 1 时，发生溢出，R-S 触发器的 S 端被置 1，引脚 PWM 端变成高电位。

（2） 将某一个要转换的数字量写入到脉冲宽度调制寄存器中，其值不断地与 8 位循环计数器的内容比较，二者相等时，比较器向 R-S 触发器的 R 端送去一个高电平脉冲，使 PWM 端改为低电位。

（3） 可以看出，8 位循环计数器的内容控制 PWM 端出现高电平的时间；脉冲宽度调制寄存器控制 PWM 端出现低电平的时间，二者相互配合便形成了宽度可变的脉冲波。

如图 5-7 所示为电磁可变气门的 PWM 功率驱动模块的时序逻辑图。

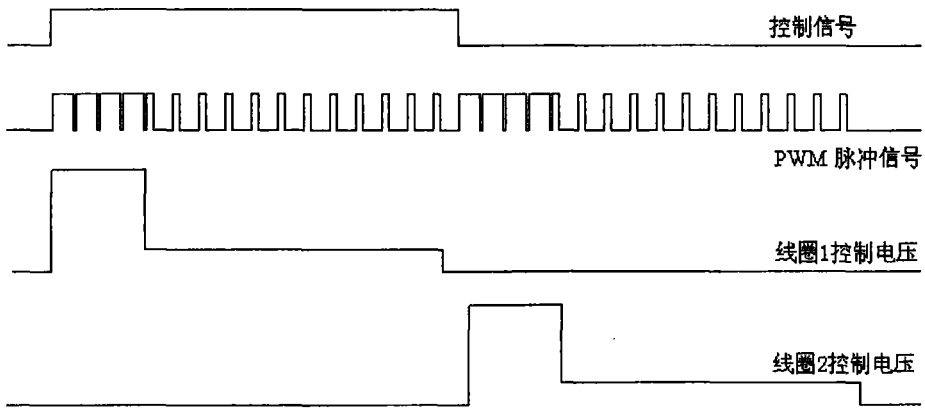


图 5-7　功率驱动模块控制时序逻辑图

Figure 5－7　Sequential logic diagram of power drive module

2. PWM 驱动电路的设计

如图 5-8 所示为功率驱动电路的原理图。图中各环节的功能分别为：

（1）缓冲器

对 PWM 引脚输出的 TTL 电平的调制脉冲波做进一步的加工，使从缓冲器输出的波形在标准的 0V～5V 范围内变化。

（2）滤波器

由电阻 R 和电容 C 组成的阻容滤波器可以有效地抑制干扰信号，减小尖峰脉冲和高频噪声，保证有用信号的平滑性。

（3）功率放大器

由于单片机的 D/A 转换的输出驱动能力小于 2mA，而电磁铁内磁场的励磁电流为 10～20A，因此必须提高 D/A 转换器输出模拟信号的驱动能力，对输出信号进行功率放大。采用光耦作为输出隔离器，使数字电路与模拟电路相隔离，从而避免电路中的大电流对单片机部分的数字电路造成干扰，或使单片机程序跑飞。

（4）电流限幅电路

当电磁铁线圈电流过载时，会产生大电流，从而有可能损坏线圈，或使线圈烧毁，因此设计了一种电流限幅电路，可以在电流超过一定值时，切断供给电磁铁的电源。为便于对电磁铁回路中的电流进行检测，需要将电流信号转换成为电压信号，然后提供给单片机的输入通道，让片内的 A/D 转换器对其进行转换。

驱动器的设计不仅要求良好的控制特性和高精度，驱动器的功耗以及功率转换效率也是我们应该关注的指标。同时，为了保护控制器，系统的高压、功率电路部分应当与低压、小信号电路部分有良好的电隔离，这一分界面正好处于驱动器部分。

驱动电路完成对信号的传递，首先是各级电平要跟随，且信号的延时时间不得太大，驱动电流大小要适当，既要使功率管在导通时有一定的饱和深度，又不能过深而造成恢复困难；要适应电源有较大幅度的波动；驱动电路宜简不宜繁等等。

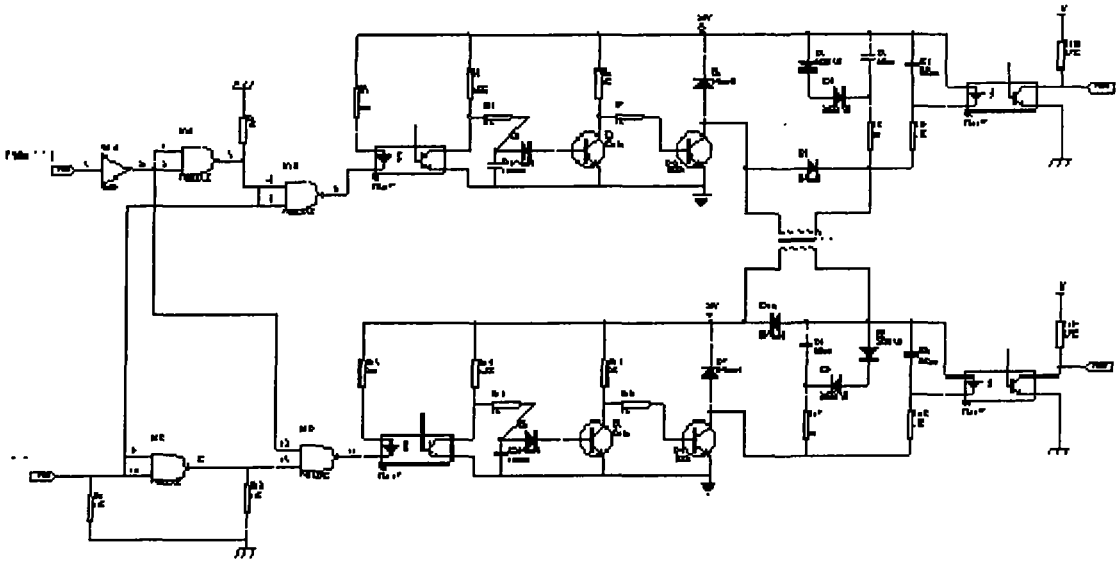


图 5-8　功率驱动电路图

Figure 5－8　Diagram of power drive circuit

5.3.2.2 功率开关器件的选择

驱动电路的很大一部分性能取决于功率开关器件本身，所以选取合适的功率开关器件是设计好功率驱动模块的前提。目前，应用于驱动模块的功率开关器件主要有：达林顿晶体管（DT）、功率场效应晶体管（VDMOS）和绝缘栅型双极型晶体管（IGBT）。

达林顿晶体管 DT（Darlington Transistor）亦称复合晶体管，属于电力晶体管(GTR 或 BJT)的一种，是电流驱动型器件。它采用复合过接方式，将两只或更多只晶体管的集电极连在一起，而将第一只晶体管的发射极直接耦合到第二只晶体管的基极，依次级连而成，最后引出 E、B、C 三个电极[83]。

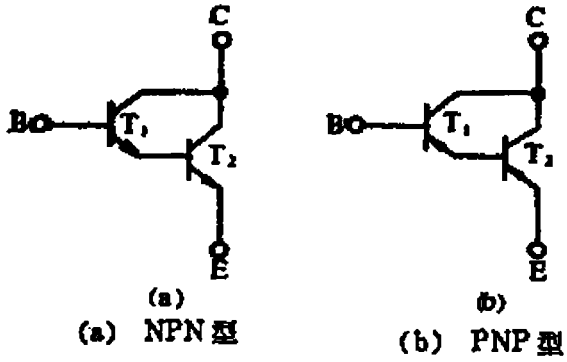


图 5-9　达林顿管的基本电路

Figure 5－9　Circuit diagram of Darlington Transistor

图 5-9 是由两只 NPN 或 PNP 型晶体管构成达林顿管的基本电路。假定达林顿管由 N 只晶体管（T_1-T_n）组成，每只晶体管的放大系数分别为 h_{FE1}、h_{FE2}、h_{FEn}。则总放大系数约等于各管放大系数的乘积：　$h_{FE} \approx h_{FE1} \cdot h_{FE2} \cdots\cdots h_{FEn}$

因此，达林顿管具有很高的放大系数，其值可以达到几千倍，甚至几十万倍。利用它不仅能构成高增益放大器，还能提高驱动能力，获得大电流输出，可达数百安培。它的集电极与发射极之间具有电导调制效应，导通压降低，功率大，而且价格便宜，使用方便，完全可以满足电磁气门系统的要求。

VDMOS 是电压驱动型器件，具有如下特点：

（1）VDMOSFET 是多子器件，无少子存贮效应，工作频率高，开关速度快，开关损耗小。

（2）VDMOSFET 是压控器件，输入阻抗高，电流增益大，驱动功率小，驱

动电路简单。

（3） VDMOSFET 是短沟道器件，跨导线性高，放大失真小，

（4） 漏极电流负温度系数，无二次击穿效应，安全工作区宽，热稳定性好，易于大功率合成。

它的缺点是随着额定电压的升高，导通电阻急剧增大，使流过的电流受到限制，不利于高压驱动电路，而且价格比较昂贵。

绝缘栅晶体管（IGBT）是一种新型的 MOS 控制型电力开关器件，在稳态下 IGBT 可看成为一个由 N 型 MOS 驱动的 PNP 厚基区双极晶体管。IGBT 有较高的输入阻抗、高速开关特性和双极晶体管大电流密度的特性。由于 IGBT 的通态压降较低，所以其导通损耗比 P-MOSFET 要低得多，但由于 IGBT 的基区存在着分子注入积累，所以它的集电极电流在下降时有一个尾部电流，这个电流是引起关断损耗的主要因素，使得 IGBT 的开关损耗比 P-MOSFET 高，因此限制了它的工作频率，并且它的价格非常昂贵。

通过对上面三种功率开关器件的性能综合分析可知，DT 是比较适用于电磁气门系统驱动电路中的功率开关器件。

如图 5－10 给出了自行研制的电磁可变气门功率驱动电路的照片。

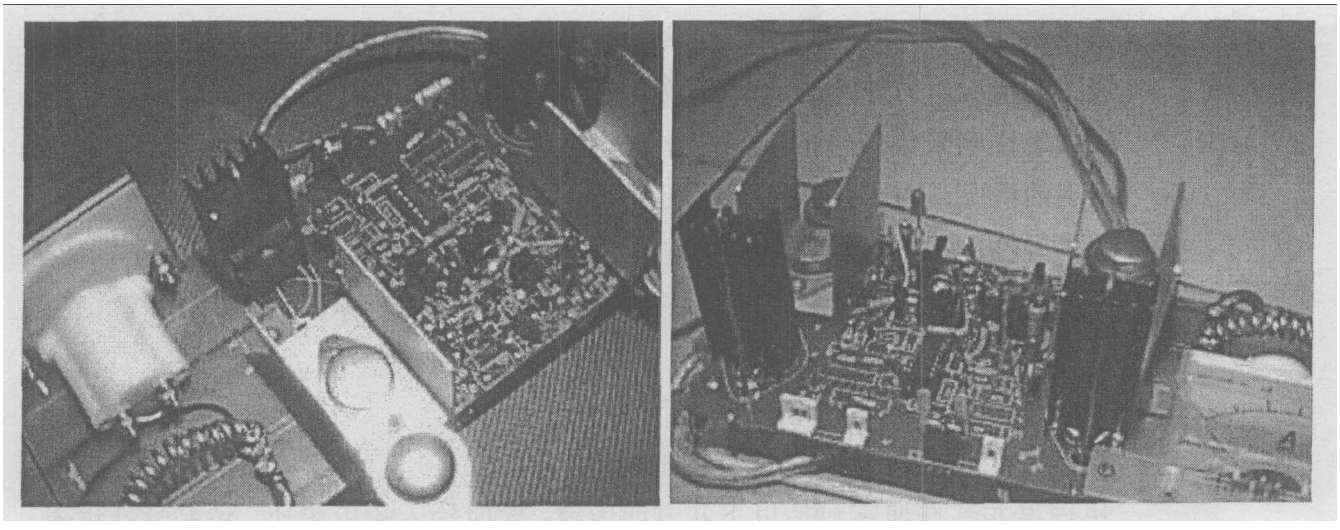


图 5-10　功率驱动电路照片

Figure 5－10　Photo of power drive circuit

§5.4 EMVA 控制系统的软件设计

电控单元的控制软件是系统的核心。它将系统模型、控制算法以及整个系统资源联系在一起实现最终的控制任务。本系统的控制对象复杂、测量和控制任务重、实时性要求高，因此，合理的配置系统资源、详细的规划模块任务及时间分配、正确的软件设计方法对整个控制软件设计尤为重要。

5.4.1 软件设计任务及要求

本系统的控制任务包括：

1） 对系统进行管理：负责系统的正常启动、停车；控制采样数据文件的打开、关闭等；对外围设备进行检查、初始化工作等。
2） 按要求设置采样参数，如采样速率、长度和通道等；
3） 跟踪气门的位置，控制其运动速度；
4） 检测过载运行状态以及与主机进行通信

根据软件工程及试验的需要，控制系统对软件设计有如下要求：

1） 可靠性：试验是在电磁气门试验台架上进行的，台架模拟了电磁气门的运行情况。由于运行过程由软件直接控制，不合理的软件设计除了不能使系统工作在最佳状态，还有可能出现运行不正常，比如电流过大导致线圈或电路被烧毁的情况。另外，由于试验现场还有各种各样的电磁干扰、振动、噪声等，极大地影响采集信号的准确性，这些都要求在软件设计时充分考虑各种可能出现的情况，力求使软件可靠地工作。
2） 可扩展性：根据试验结果，可能有必要对某些参数进行进一步的分析，或者在某些情况下添加一些功能模块，这些都要求软件要有良好的功能可扩展性。

5.4.2 软件设计总体方案

电控单元软件通常包括以下几方面内容：实时输入输出模块、控制算法模块、通讯模块及电控单元的故障判断和安全处理模块等。以上各模块在电控单元中相对独立又互相渗透，实现了完整的电控单元控制任务。

如图 5-11 所示是系统的软件逻辑结构图，软件系统主要由主程序和中断服务程序两部分构成。

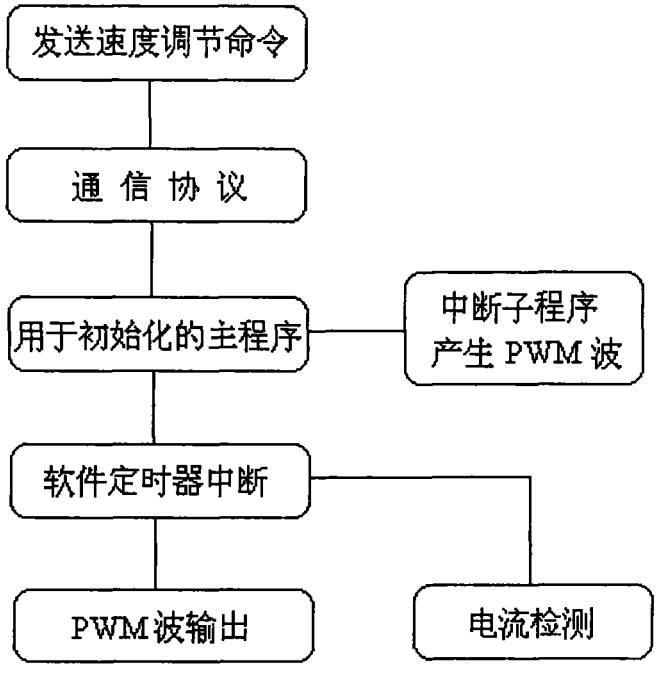


图 5-11　系统软件逻辑结构图

Figure 5－11　Software logical structure diagram of system

1. 主程序

主程序主要用来对 80C196KC 的各片内外设进行初始化，并为各个中断驱动的控制任务开放中断。初始化之后，80C196KC 进入待机方式，以便在不执行控制任务时降低功耗。主程序的流程图如图 5－12 所示。

在对气门进行精确的位置控制之前，必须建立一个电磁阀位置与时间序列的参考表，根据时间序列产生中断响应，再根据参考表里的数据计算输出控制电压的大小，最后转换成 PWM 波的占空比。

2. 软件定时器中断服务程序

软件定时器中断服务程序每 500 μs 执行一次，它决定了 PWM 信号的采样速率。图 5－13 是其流程图，该程序是控制系统的核心软件。程序根据时间信号计算气门的当前位置，并根据电流信号检测是否有过载运行状态。通过控制算法获得所要求的 PWM 波的占空比序列，形成 PWM 控制电压去驱动电磁阀，最后返回主程序。

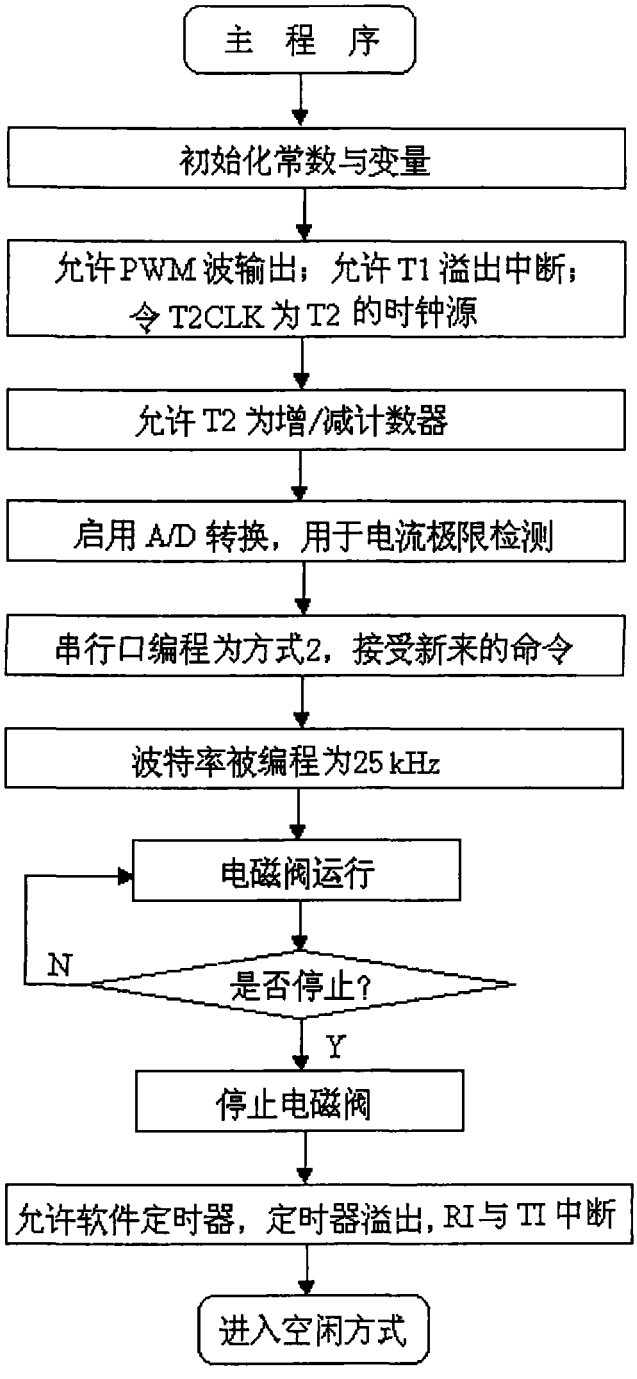


图 5－12 主程序流程图

Figure 5－12 Diagram of the main program flow chart

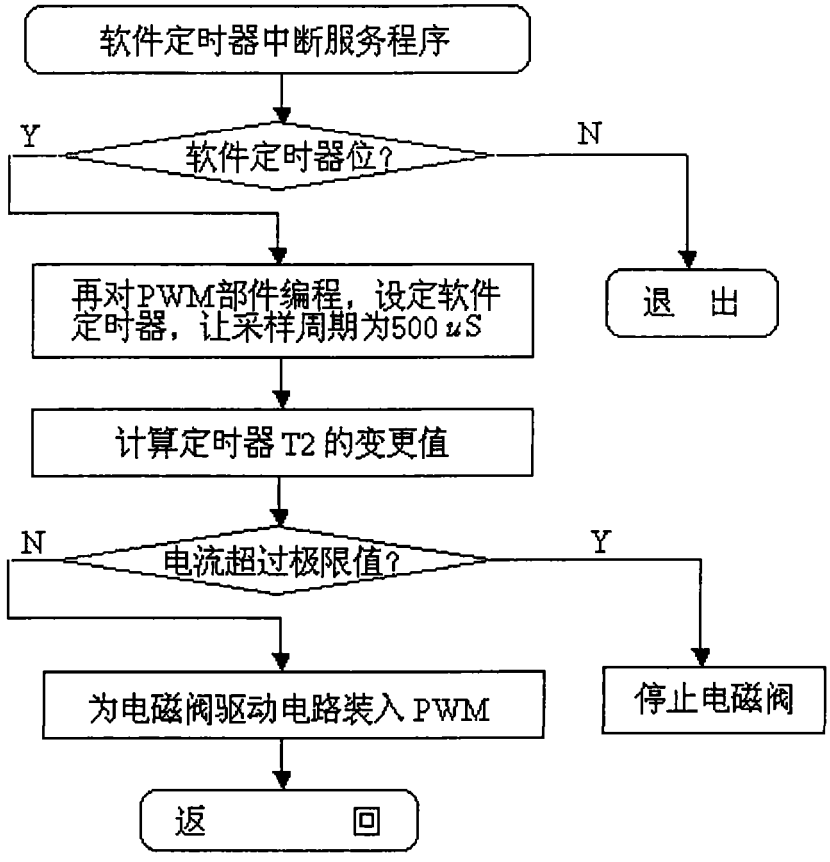


图 5－13　软件定时器中断服务程序流程图

Figure 5－13　Flow chart diagram of software timer interrupt service program

本章小节

电控单元的硬软件设计是整个 EMVA 控制系统的核心内容，它决定了整个系统的功能及可靠性。本章对电控单元的软硬件进行了详细设计，实现了电控单元的所有要求。主要包括：ECU 结构总框图、单片机选择及其资源配置、功率驱动电路以及其它接口电路的设计；ECU 软件总流程及各模块的分析设计过程。

EMVA 控制系统的软硬件设计是一个循序渐进、不断改进提高的过程，本章给出的是EMVA 电控系统最基本的雏形，实现了 EMVA 电控系统的开环控制要求，为 EMVA 机构的探索性研究提供了试验基础。但是距离 EMVA 在实际工作条件下的电控应用还有很大差距，还需要在多方面进行完善和提高。

第六章　EMVA 试验测试系统的研究开发与结果分析

本章的主要内容：

在 EMVA 机构设计出来后，需要进行大量的测试分析试验。因为没有必要的试验装置和测试手段，就无法深入探讨 EMVA 系统的工作机理，无法验证与完善 EMVA 系统的工作过程的模型仿真，不能有效地进行新一轮的设计与开发，从而进一步提高电磁阀的工作性能，改进其动态响应特性。

目前国内尚未对电磁全可变气门机构进行较为深入和系统的研究，无法直接买到与已研制出的机构相配套的、现成的试验测试系统。为此，自行研制了电磁全可变气门的静态和动态试验测试系统。根据试验测得的结果，可以了解电磁气门的实际工作性能，为进一步的研究开发提供可靠依据。

§6.1　静态试验测试系统设计

6.1.1　静态试验测试系统原理

EMVA机构的电磁性能直接表现为电磁铁线圈中电流的变化规律和电磁铁产生的电磁作用力的变化规律，因此，可以通过测试电磁铁的线圈电流与电磁作用力的变化规律来分析和探讨电磁阀的电磁特性。

为深入研究EMVA机构的电磁性能，研制了专用的EMVA机构电磁性能测试系统。图6－1给出了该测试系统的组成框图。

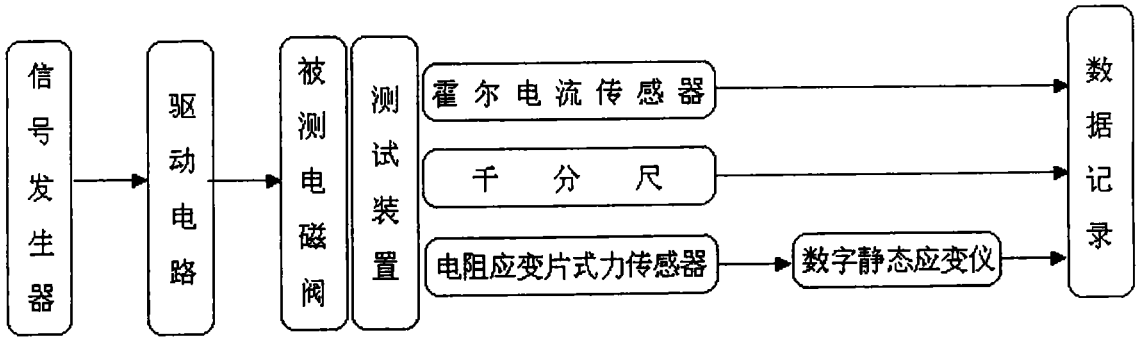


图6－1 电磁阀静态试验装置测试系统

Figure 6－1 Diagram of static-state test equipment of EMVA

EMVA机构的静态试验装置可以用来测量电磁阀的静吸力特性。电磁阀的静吸力特性为：线圈电流 I 为常数时，电磁作用力 F_{mag} 与工作气隙 δ 的关系：$F_{mag}=f(\delta)$；工作气隙 δ 为常数时，电磁作用力 F_{mag} 与线圈电流 I 的关系：$F_{mag}=f(I)$。静吸力特性揭示出电磁阀在一定的工作间隙、一定的线圈电流情况下所能得到的电磁作用力值，是衡量电磁系统稳态工作能力的重要指标。不同型式的电磁铁的静吸力特性的形状是不同的，通过静态试验，可以得出静吸力特性曲线，为以后的电磁阀中静铁芯的结构优化打下基础。另一方面，静态试验还为动态试验打下了基础，利用静态试验结果，可以分析研究在PWM驱动电压作用下线圈电流和电磁作用力随时间的变化规律，以及感应涡流、磁饱和等电磁现象对线圈电流和电磁作用力上升与下降过程的影响规律。

测试系统的工作过程大致为：信号发生器发出方波脉冲信号，经由驱动电路将信号转换为脉冲电压，施加于安装在测试装置上的电磁铁线圈的两端，电磁线圈励磁，进而在静铁心与衔铁间产生电磁吸引力。在工作过程中，利用电阻应变片式力传感器实时测取电磁作用力的变化规律，使用霍尔电流传感器实时测量线圈电流，利用千分尺测量工作气隙的大小。

6.1.2　测试系统的设计

静态试验装置测试系统由以下几部分组成：直流稳压电源、信号发生器、驱动电路、测试装置、传感器、静态数字应变仪、千分尺、示波器等。

1. 测试装置的设计

测试装置的设计是实现电磁阀各测试参数精确测量的基础。测试装置上安装电磁阀、力传感器等，并通过调整螺纹来调节静铁芯与衔铁之间的工作间隙。测试装置的结构示意图见图6－2。

1）传力部件

为提高测试系统对电磁作用力动态变化规律的测量精度，要求由传力部件和力传感器所组成的弹簧质量系统具有较大的刚度。因为它的固有频率越高，传感器越能真实地响应作用力的快速变化规律。此次设计的传力机构的整体串联刚度接近于传感器本身的刚度。

2）工作间隙调整螺栓

工作间隙调整是通过调整螺栓来调节的。由于在静铁芯通电时，调整螺栓要

承受较大的压力，因此在设计调整螺栓时校核了其螺纹强度。同时为了调节方便，调整螺栓采用了细牙螺纹，从而确保了螺纹的自锁能力，也提高了工作间隙的调整精度。

3）工作间隙均匀性

测试装置充分考虑了通过合理的结构设计以及加工、装配来确保安装后的静铁心与衔铁之间的工作间隙均匀。

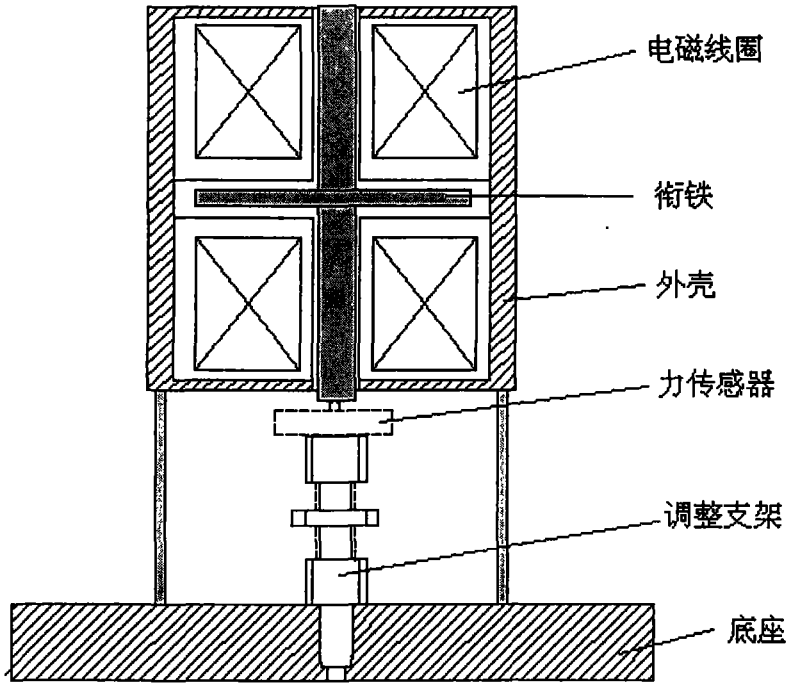


图6－2　测试装置的结构示意图

Figure 6－2　The configuration sketch map of test equipment

2. 电磁阀静铁芯和线圈之间工作间隙的测量

静铁芯和衔铁之间的工作间隙是变化的，并且每次测量调整量比较小，为了确保工作间隙的测量精度，采用千分表来测量静铁芯与衔铁之间的工作间隙。

3. 电磁作用力的测量

测量电磁作用力的办法很多，如弹簧秤法、悬重拉力法、测弹簧压缩法等，这三种测量方法操作程序复杂，测试效率和测量精度都较低[84]。因此本测试系统采用力传感器测量法进行电磁力的测量。

力传感器常用的一般为两种：电阻应变片式力传感器和压电式力传感器。由于我们测量的电磁力为静态电磁作用力，而压电式力传感器不能测量静态作用力（主要是由于电荷放大器不具备零频率响应），所以我们选用电阻应变片式力传感器。

我们采用的电阻应变片式力传感器的结构示意图如图 6－3 所示。电阻丝应变片是用直径为 0.025mm 左右，具有高电阻率的电阻丝制成的，为获得高的电阻值，将电阻丝排列成栅状，称为敏感栅，并粘贴在绝缘的机座上。应变式传感器是将应变片粘贴于弹性体表面或直接将应变片粘贴于被测试件上。弹性体或试件的变形通过基底和粘结剂传递给敏感栅，使其电阻值发生相应的变化，并通过转换电路转化为电压或电流的变化，即可测量应变。此传感器具有线性度和精度高、结构简单，体积小，重量轻，价格低廉，对力作用位置不敏感等优点，非常适合本测试系统对于电磁阀电磁作用力的测量。

此传感器是由合肥工业大学工程力学教研室制作的，其性能参数如下：

额定载荷：150kg；

灵敏度：　1 με/N；

灵敏系数调节范围：1.80~2.60。

此外，由于电阻应变片式力传感器输出的是电压量，为了将电压量转化为力的数值，需要数字静态应变仪。本系统使用的数字静态应变仪为上海迈杰科技有限公司生产的MYJ—6型静态电阻应变仪。

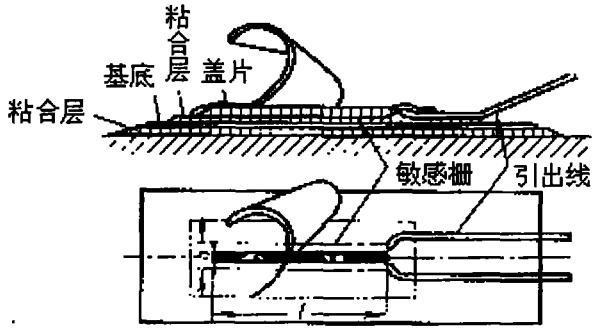


图6－3　电阻应变片力传感器示意图

Figure 6－3 The sketch map of strain gauge transducer

4．电磁线圈电流的测量

在电力系统中大量使用的大功率晶体管、整流器和可控硅，以及采用交流变频调速及脉宽调制电路，使得电路中不再只是传统的50周的正弦波，出现了各种不同的波形。对于这类电路，采用传统的测量方法（如分流器、电流互感器等）已经不能反应其真实波形，而且电流、电压检出元件也不适应中高频、高di/dt电流波形的传递和检测。因此，霍尔电流传感器成为测量此类电路的主要检测元件[85]。

现有霍尔电流传感器分直检式和磁平衡式两种。直检式的测量范围、带宽等有一定的限制，当电流增大后，磁芯可能达到饱和；随着频率升高，磁芯中的涡流损耗、磁滞损耗等也会随之升高，这些都会对测量精度产生影响。磁平衡式霍尔电流传感器在测量大电流时磁芯中的磁感应强度极低（理想状态应为零），不会使磁芯饱和，也不会产生大的磁滞损耗和涡流损耗。它具有以下工作特点：

1）它可以实现电流的"无电位"检测。即测量电路不必接入被测电路即可实现电流检测，它们靠磁场进行耦合。因此，检测电路的输入、输出电路是完全电隔离的。检测过程中，被测电路的状态不受检测电路的影响，检测电路也不受被检电路的影响。

2）霍尔电流传感器可以检测从直流到100KHz（通过仔细的设计和制作，甚至可以达到MHz级）的各种波形的电流，响应时间可短到1 μS 以下。

3）采用补偿式测量原理，所以具有良好的精确度和线性度。

因为本系统要检测的电磁线圈的电流很大，动态时变化率较高，鉴于霍尔电流传感器的上述工作特点，同时兼顾到动态和静态试验装置，决定选用河原市雅达电子有限公司生产的YDG-HSD型磁平衡式霍尔电流传感器。其工作原理及外形如图6－4所示。

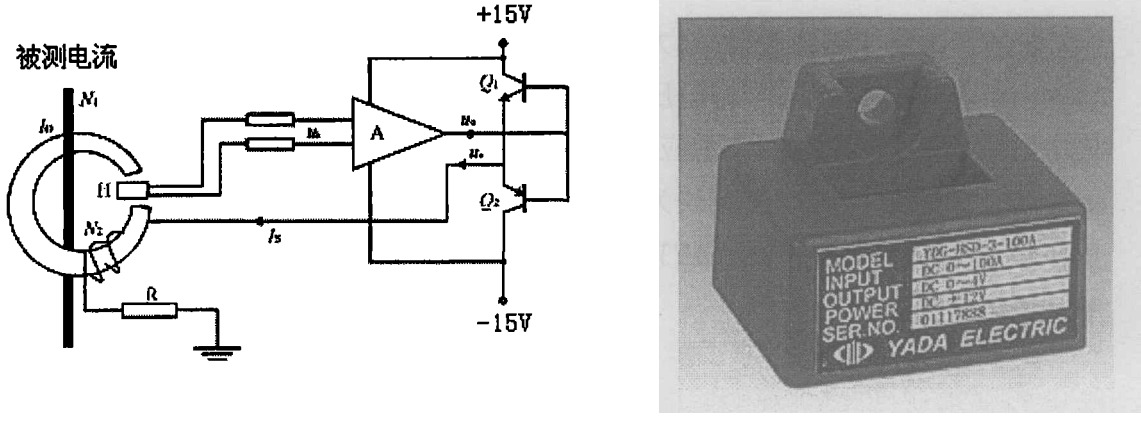


图 6－4　电流传感器外形及工作原理示意图

Figure 6－4　The diagram of shape and operating principle of current sensor

YDG-HSD型磁平衡式霍尔电流传感器，是一种利用霍尔效应，采用磁补偿原理，原边与副边高度电隔离，副边真实反映被测直流、交流、脉动电流等原边波形的传感器。它的具体技术指标是：

- 测量范围：0～50A；
- 频率特性：0～10KHz；

- 精度等级：优于±0.5%IN；
- 工作温度：0～70℃；
- 线性度：优于0.2% ；
- 工作电源：±12V～±15V ；
- 反应时间：小于10 μS；
- 内置电源浪涌、极性反接保护。

需要注意的是，当原边折返线圈有N圈时，副边测量电流则为原边线圈中通过的电流的N倍，这一点在进行测量时需要考虑到。

应用上述电磁性能测试系统，作者成功地测取了电磁全可变气门的静吸力特性的变化规律，探讨了其动态电磁特性。有关内容将在本论文的第 6.3 节中详述。

§6.2　动态试验测试系统设计

虽然静态试验的结果——静态吸力特性可以为电磁气门的工作过程提供一定程度上的指导意义，但是电磁气门在运动过程中所表现出来的动态吸力特性却是与静态吸力特性很不相同的。动态吸力特性揭示出了电磁气门运动过程中线圈电流 I 、电磁作用力 F_{mag} 、线圈磁通量 ϕ 和衔铁运动速度 v 随时间 t 或气门升程 x（或曲轴转角）变化的规律；通过动态、静态试验的比较，可以得到涡流、磁滞效应对电磁阀工作过程的影响规律。通过动态试验，可以得到运动质量和弹簧预紧力对响应时间的影响规律；同时能直接得到气门在极限位置时的电磁作用力（落座冲击力）和气门落座速度（经过对气门升程进行微分）；还能够对空气阻尼的影响进行考察等。这些对于今后电磁气门的进一步优化设计提供了依据。

动态试验需要测定的参数为：电磁作用力 F_{mag} 、气门升程 x 、线圈电流 I 等。

图6－5给出了EMVA机构的动态测试系统图。测试系统包括如下几个部分：计算机、ECU、电源、驱动电路、电磁阀、测试装置、检测部分，其功能如下：

1） 具有扩展功能的 ECU：它采集系统所需的反馈信号，通过预定的控制策略，输出精确、可靠的控制信号，通过驱动模块，使电磁阀按照要求动作。
2） 电磁阀体：控制系统的执行元件，通过传感器的输入信号来确定输出信号，从而驱动系统工作。
3） 功率驱动控制单元：为电磁铁线圈提供驱动电流，向电磁阀提供输入能量确保它快速、强力地工作。

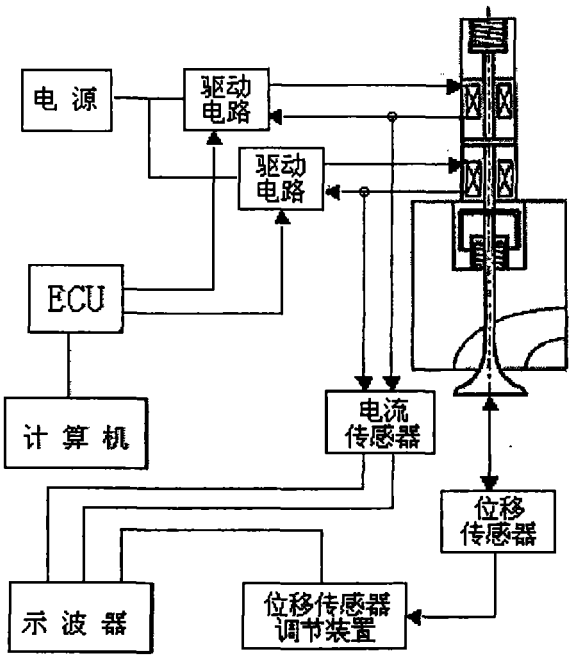


图 6－5　　EMVA 动态测试系统图

Figure 6－5　Dynamic-state testing system of EMVA

6.2.1 动态测试系统试验参数的测量

在测试系统的检测部分中，通过传感器主要测取了如下重要参数，如图 6－6 所示，利用示波器将测得的位移、电流和磁通变化率波形实时显示。

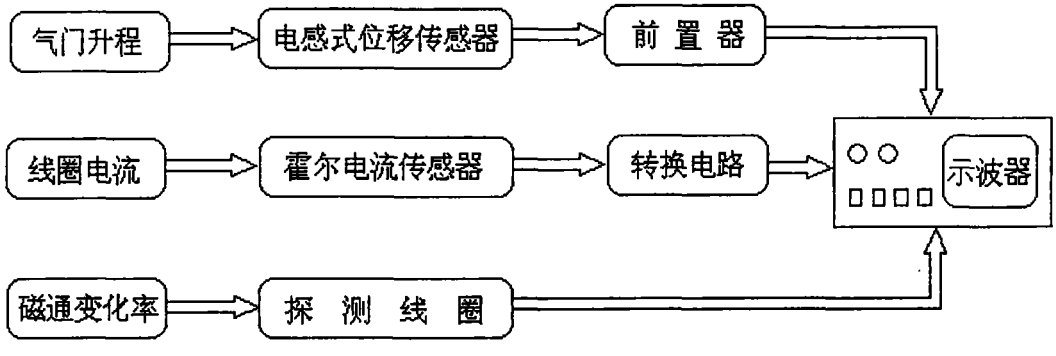


图 6－6　电磁阀工作过程检测部分示意图

Figure 6－6　The measurement sketch map of EMVA working process

1．线圈电流的测量

仍采用YDG-HSD型磁平衡式霍尔电流传感器测量电磁阀工作过程中电磁线圈电流的变化情况。

2．气门升程（位移）的测量

测量位移的传感器有很多种，常见的有电位器式、电感式、光电式和电涡流式等。

电位器式传感器结构简单、稳定性好、输出信号大，但是灵敏度低，不宜测量比较小的位移。

光电式传感器的频响特性好，灵敏度高，对电磁阀的运动状态没有影响，但由于电磁阀本身的结构限制，无法使用它进行测量。

电涡流式传感器是非接触式的位移传感器，对电磁阀的运动没有任何影响，且灵敏度高、频率响应好，但是它对被测物体的要求很高，被测物体的材料、表面平整度、表面磁效应、表面镀层以及表面形状、表面尺寸都会对传感器的精度产生非常大的影响。另外，电涡流传感器的感应磁场很弱，因此周围存在的杂散磁场对其灵敏度会产生很大的影响，同时也会在信号中夹杂干扰磁场的成份。所以，屏蔽措施是非常必要的。电涡流传感器还存在信噪比较低的不足，这是其转换电路中的电子元器件的固有噪声所致，要提高信噪比就需提高灵敏度，但这又会使传感器的线性范围受到限制。

电感式位移传感器具有灵敏度及准确度较高、线性好、性能稳定可靠以及价格便宜等特点，并且工作时不受灰尘等非金属因素的影响，低功耗，长寿命，可使用在比较恶劣的条件下，在机械运动的测量和控制中得到广泛应用。因此，本测试系统选用了这种位移传感器。

电感式位移传感器的工作原理：它是建立在电磁感应的基础上，把被测位移转换成自感系数L或互感系数M的变化，将一根推杆插入测量传感器管内孔里的机械位移。在这管里有一个电桥线圈，线圈被交流激励。推杆端部一段磁敏感材料位置变化引起中心抽头之间电桥线圈阻抗发生变化。阻抗被转化成电压。这样输出电压与推杆位置之间有一线性关系，而推杆与传感器棒内孔同心度没有要求。这样位移变化就通过专用的测量电路转化成一定比例关系的电压值，通过示波器便可观察变化过程。电感式位移传感器的测量电路原理如图6－7所示，其外形示意图如图6－8所示。

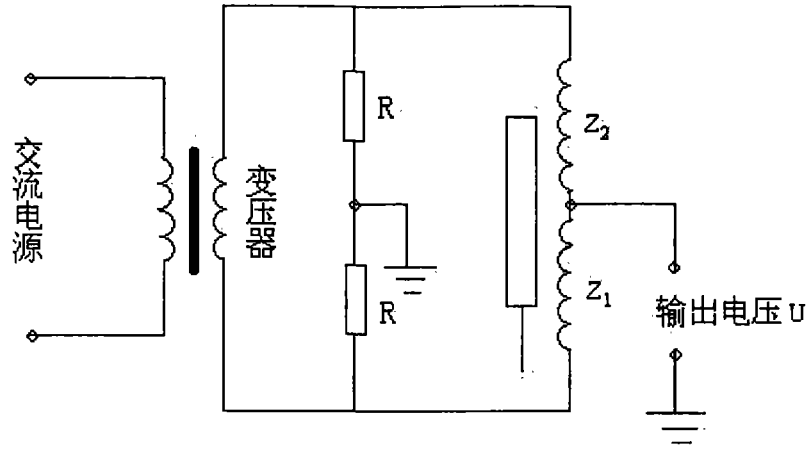


图6－7　电感式位移传感器测量电路原理图

Figure 6－7　Circuit principle diagram of inductance displacement sensor

本测试系统采用了中国科技大学精密仪器系开发研制的VLG10系列电感式位移传感器，它包括传感器探头和前置器两部分。其主要技术指标为：

- 测量范围：10.0mm；
- 响应时间：3ms；
- 精度等级：1.0%；
- 工作温度：-25～75℃；
- 工作电源：220V　AC ；

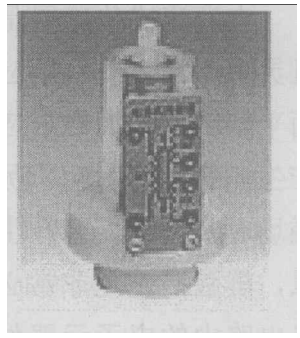


图6－8　电感式位移传感器示意图

Figure 6－8　The shape of inductance displacement sensor

3. 磁通变化率的测量

在电磁阀工作过程中，电磁阀线圈中的磁通量是一直在变化的。对磁通量进行测量是研究电磁阀工作过程机理所必须的，磁通量的变化规律对于磁路优化设计具有重要意义。

在电磁线圈中单独加一匝线圈作为探测用，即可完成对磁通量变化率的测量。根据法拉第电磁感应定律，当磁场中磁通量发生变化时，在探测线圈中产生的感应电动势为：

$$e=-\frac{d\varphi}{dt} \qquad (6.1)$$

式中各参数含义为：

e——感应电动势（V）；

φ——磁路磁通量（Wb）；

t——时间（s）。

对磁通量变化率进行积分，即可得磁通量的变化规律。

6.2.2　动态测试系统测试台架的设计

在测试系统中，被测电磁阀、电流传感器、电涡流位移传感器都装在测试台架上。测试台架设计是否合理是电磁阀工作过程中各物理量精确测量的基础。图6—9给出了测试台架的结构示意图。

在电磁阀工作过程中，电流传感器和电涡流位移传感器测出的信号是测试台架的动态特性和被测电磁阀动态特性的综合反映。如果测试台架设计不合理，就会导致测试台架本身的动态特性严重影响被研究电磁阀的动态特性测试结果。减轻测试装置对电磁阀测试结果影响的主要办法是尽量消除测试装置的振动和提高传感器的安装刚度，前者可以通过提高测试装置系统刚度和加上适当预紧力来实现，后者通过正确安装传感器及提高传感器的接触刚度来实现。

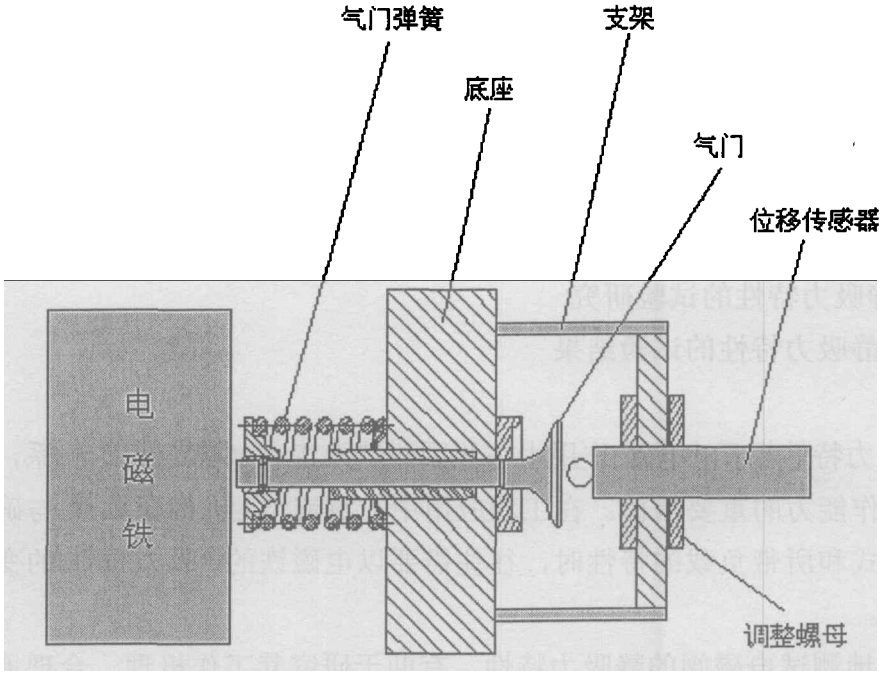


图6-9　动态测试系统台架示意图

Figure 6—9　Diagram of dynamic-state test bench

6.2.3　驱动电路的设计

本测试系统中的驱动电路采用图5—8所示的电路。电磁气门的工作过程如图6—10所示。

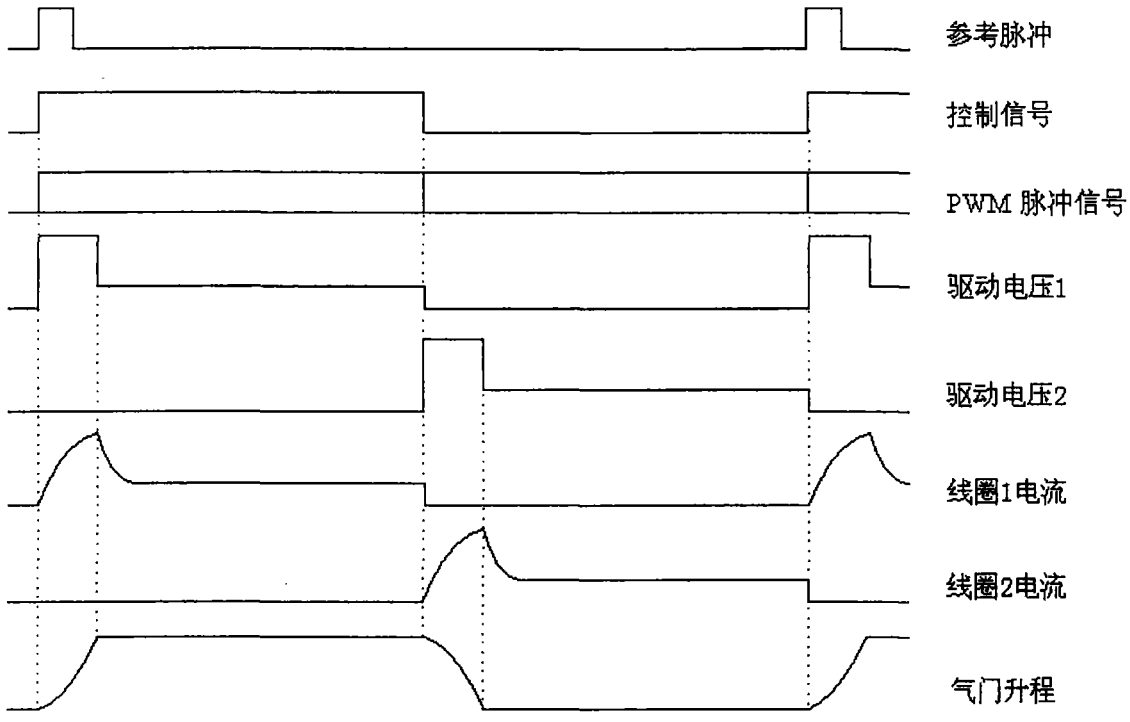


图 6－10　电磁气门的工作过程图

Figure 6－10　Working process diagram of EMVA

§6.3 电磁全可变气门机构的试验及结果分析

6.3.1　静吸力特性的试验研究

6.3.1.1 静吸力特性的试验结果

静吸力特性揭示出电磁作用力与线圈磁势及工作间隙之间的关系，是衡量电磁气门工作能力的重要指标。在工程应用中，直流电磁机构在选择与确定电磁铁的结构型式和所带负载的特性时，往往需要以电磁铁的静吸力特性的变化规律作为依据[86]。

系统地测试电磁阀的静吸力特性，有助于研究其工作机理，合理地确定在电磁阀工作时线圈中通过的电流的大小，以及合理地选择电磁阀的各种参数，如弹簧刚度与预紧力、气门升程和残余间隙等，同时可以为以后的电磁铁结构型式的选择和优化设计打下良好的基础。

图 6-11～图 6－19 给出了自行研制的采用硅钢片铁磁材料的电磁阀的静吸力特性变化曲线。其中图 6－11～图 6－14 给出的是电磁作用力 F_{mag} 和工作气隙 δ 的函数关系曲线，图 6－15～图 6－19 给出的是电磁作用力 F_{mag} 和线圈工作电流 I 的函数关系曲线。 图中的点是试验测得的点，图中的曲线是采用仿真方法得到的拟

合曲线。

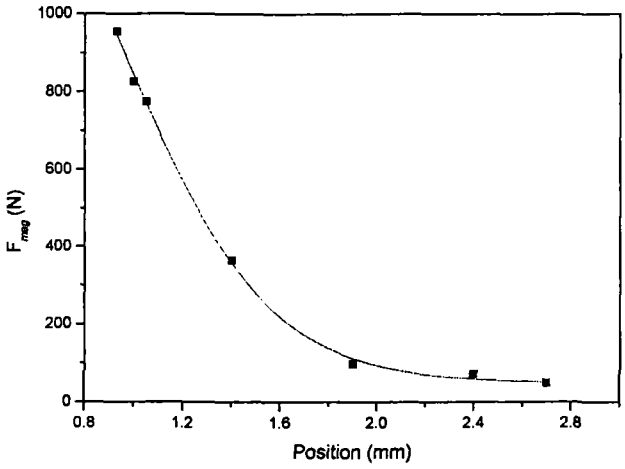


图 6－11　电流 I＝7. 8A 时的电磁作用力与工作间隙关系图

Figure 6－11　Relationship of magnetic force and valve lift when I=7.8A

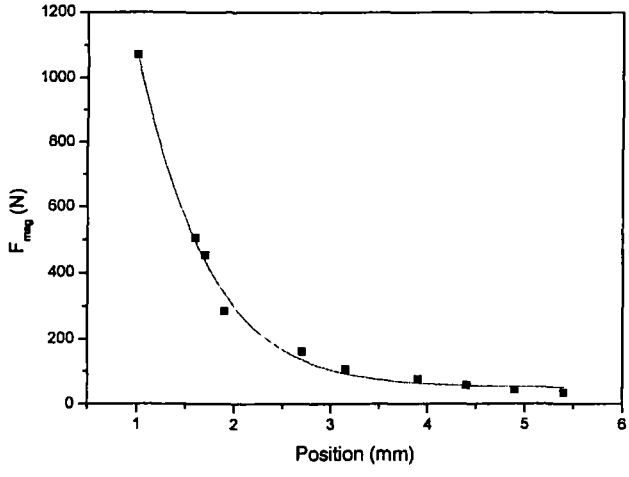


图 6－12　电流 I＝14. 4A 时的电磁作用力与工作间隙关系图

Figure 6－12　Relationship of magnetic force and valve lift when I=14.4A

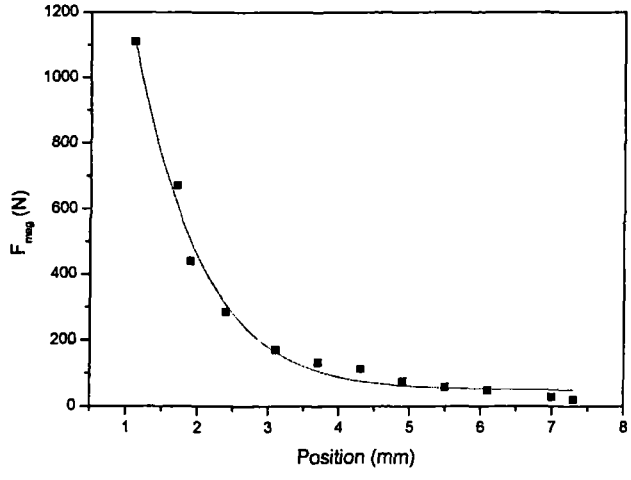


图 6－13　电流 I＝20A 时的电磁作用力与工作间隙关系图

Figure 6－13　Relationship of magnetic force and valve lift when I=20A

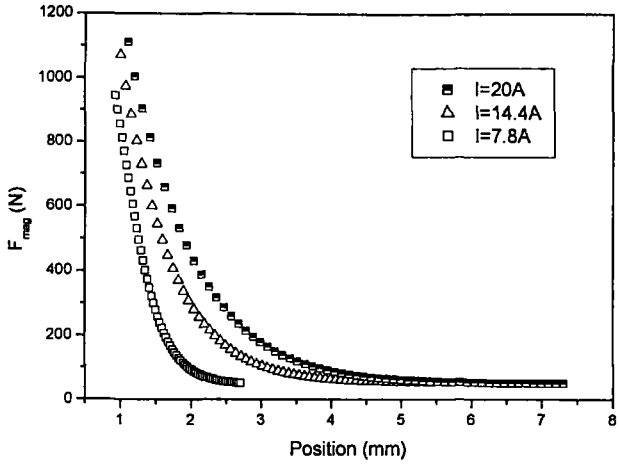


图6－14 电磁作用力与工作间隙关系拟合曲线图

Figure 6－14　Diagram of curve fitting Relationship of magnetic force and valve lift

从图 6－11～图 6－14 中可以看到电磁作用力随着工作气隙的减小而增大，并且它们之间的关系接近于二次双曲线函数曲线。由图 6－15～图 6－19 可以看出电磁作用力随着线圈电流的增大而增大，并且它们之间的关系接近于二次方幂函数曲线。

由于静吸力特性曲线的变化规律主要有电磁阀中的电磁铁结构设计型式决定的，对于直动式电磁铁，静铁心和衔铁之间的磁场分布比较均匀，可以利用式（6.2）近似分析其电磁作用力的变化规律[87]。

$$F_{mag} = kI^2 / \delta^2 \tag{6.2}$$

式中：　k 为常数，与电磁铁的具体结构有关；

I 为线圈电流；δ 为工作气隙。

由上式可知，当 I 为定值时，F_{mag} 与 δ 为二次双曲线函数关系；当 δ 为定值时，F_{mag} 与 I 为二次方幂函数关系。

式（6.2）是在忽略导磁体的磁阻和漏磁，且磁路未饱和、磁力线在气隙中分布均匀等前提和假设的情况下得出的。实际上，导磁体内总会有磁阻，且随着工作间隙 δ 的减小或线圈电流 I 的增大，导磁体会出现磁饱和，使得电磁作用力的增长缓慢，从而导致电磁作用力特性曲线严重偏离双曲线或幂函数曲线。也就是说，在导磁体未出现深度饱和时，电磁力将随着工作间隙的减小或线圈电流的增大而迅速增大。具有这种静吸力特性的电磁铁适合于电磁作用力要求较高的情况。

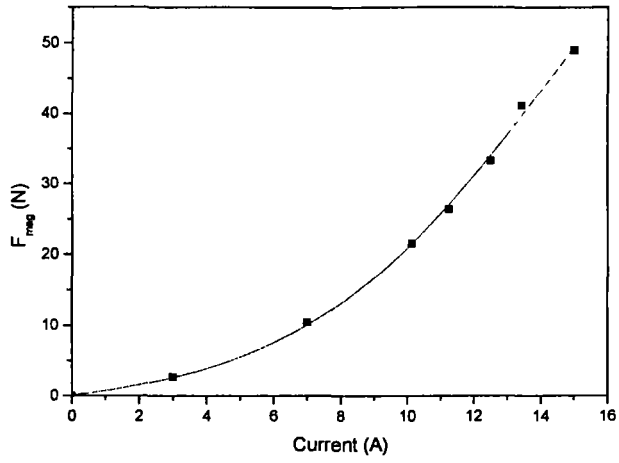


图 6－15　气隙δ＝4. 7mm 时的电磁作用力与线圈电流关系图

Figure 6－15　Relationship of magnetic force and current when δ＝4. 7mm

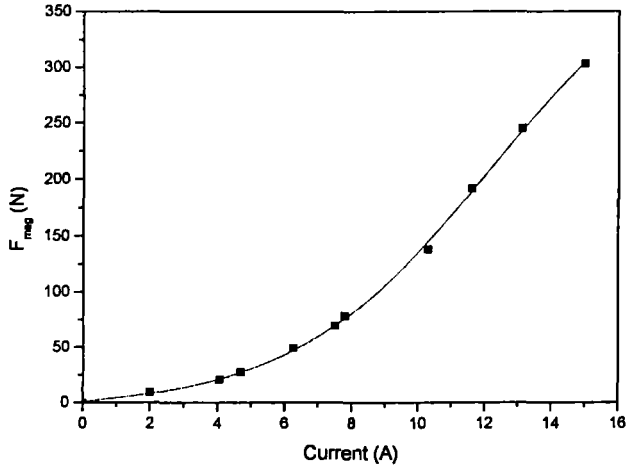


图 6－16　气隙δ＝2. 4mm 时的电磁作用力与线圈电流关系图

Figure 6－16　Relationship of magnetic force and current when δ＝2. 4mm

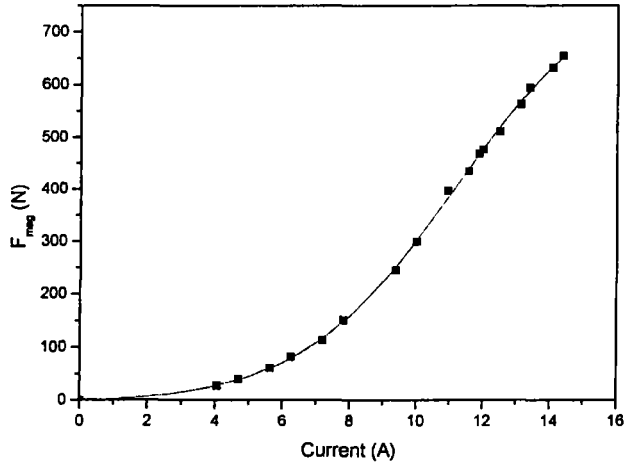


图 6－17　气隙δ＝2. 0mm 时的电磁作用力与线圈电流关系图

Figure 6－17　Relationship of magnetic force and current when δ＝2. 0mm

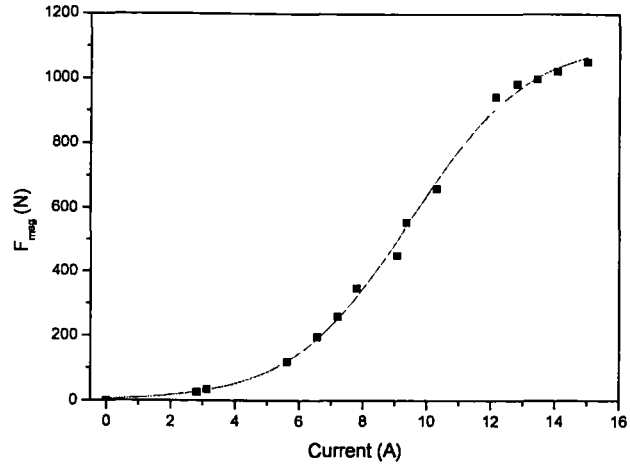


图 6－18　气隙δ＝1. 4mm 时的电磁作用力与线圈电流关系图（右）

Figure 6－18　Relationship of magnetic force and current when δ＝1. 4mm

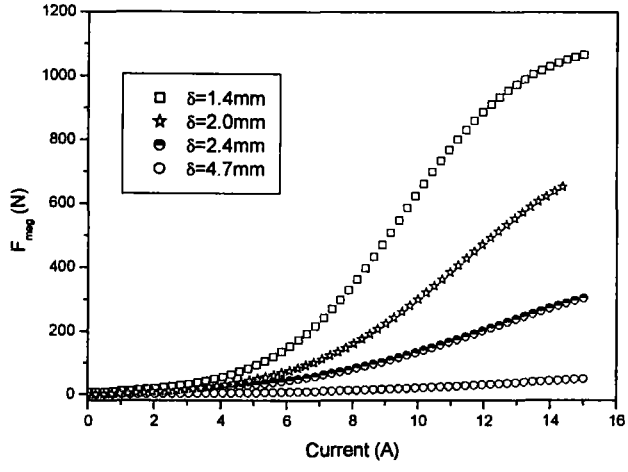


图 6－19　电磁作用力与线圈电流关系拟合曲线图

Figure 6－19　Diagram of curve fitting Relationship of magnetic force and current

由图 6－15～图 6－19 可以看出，当工作间隙为常数的时候，对线圈通以不同大小的电流，在间隙大于 2.4mm（尤其是在大于 4.7mm）的情况下，电磁作用力随电流的增大增长得很缓慢；在小于 2. 0mm（尤其在小于 1. 4mm）的情况下电磁力增长得非常快。从图 6－11～图 6－14 可以看出，在线圈电流保持不变而改变间隙的情况下，在大电流（10A 以上）时，电磁作用力随气隙的减小而增大的变化率比较大；在小电流时（10A 以下）时，电磁作用力随气隙的减小在气隙比较大时，增长得异常缓慢，但是在气隙小于一定程度时（如 2mm）增大的变化率就非常大了。

6.3.1.2　静吸力特性对电磁阀工作的意义

根据上述的静吸力特性试验结果可以看出，静吸力特性与 EMVA 机构所要求的强力高速以及软着陆的目标之间在一定程度上是相矛盾的，这就使得我们必须合理地利用静吸力特性来实现我们自行开发的 EMVA 机构的工作要求。

在初始化过程中，由于气门处于中间位置，工作气隙比较大（有 4mm），需要电磁铁能够产生大的电磁力来克服弹簧反力。从图 6－14 和图 6－19 中可以看出，在大气隙时，只有大电流才能产生较大的电磁力，而随着气隙的减小，尤其是在很小的气隙时，即使是很小的电流也能产生很大的电磁力。所以在初始化阶段，必须在线圈中通以大电流进行励磁来产生较大的电磁作用力，使衔铁具有较大的加速度快速运动；在衔铁接近上、下静铁心时，减小线圈中的电流，降低衔铁运动的加速度；当衔铁到达上、下终点位置时，只需通以很小的维持电流即可。这样既能使气门实现快速初始化，也可以降低电磁阀的能量消耗，同时避免产生很大的冲击力。

在过渡过程阶段，可以利用电磁作用力来帮助衔铁快速动作，实现气门的快速开启。从图 6－11～图 6－19 可知，合理确定气隙和电流的关系（即在多大气隙时通多大的电流）非常重要，合理的气隙和电流的关系既可以保证电磁阀的高速强力，也可以降低电磁阀的能耗。

应用于电磁可变气门机构中的电磁铁的工作行程比较大，且要求能够产生较大的电磁作用力，其目的一方面在于加快气门的运动速度，另一方面在于提供充足的电磁作用力用以密封高温高压的燃气。因此，自行研制的硅钢片材料电磁阀的静吸力特性能够满足系统对其工作特性的要求。

但是，静吸力特性是由电磁铁线圈中电流的稳态值所决定，初期研制的硅钢片材料电磁阀的静吸力特性的测取没有考虑线圈电流动态变化对电磁作用力的影响，而在电磁阀实际工作时，电磁线圈在脉冲电压激励条件下工作，线圈电流发生着急剧的变化。因此，为了寻求提高电磁阀动态工作性能的方法，合理地确定电磁铁结构参数间的关系，必须考虑线圈电流急剧变化等动态因素的影响，研究电磁阀的动态电磁特性。

6.3.2　动态电磁特性的试验研究

通过自行研制的动态测试系统对电磁可变气门的工作过程进行了初步测试，测取了一些试验结果，以便为将来的优化设计和实用化开发打下基础。鉴于时间、经费以及课题的探索性研究的关系，现阶段在设计控制系统时，没有考虑电磁气门在发动机上面临的各种复杂的实际工作情况，而只是要求其具有基本的控制功

能，能完成考察机构工作可行性的动态试验任务。因此采用的是开环控制系统，闭环控制试验尚待进行。

图 6－20 给出了在 PWM 驱动电压作用下，电磁阀线圈电流的变化规律曲线，由图中可以看出，对于电流变化情况仿真计算结果与试验结果基本吻合。图 6－21 给出了磁通变化率的试验曲线图，对磁通变化率的测量，由于探测线圈只用了一匝，因此图中实测得到的电压值就是磁通变化率的负值。

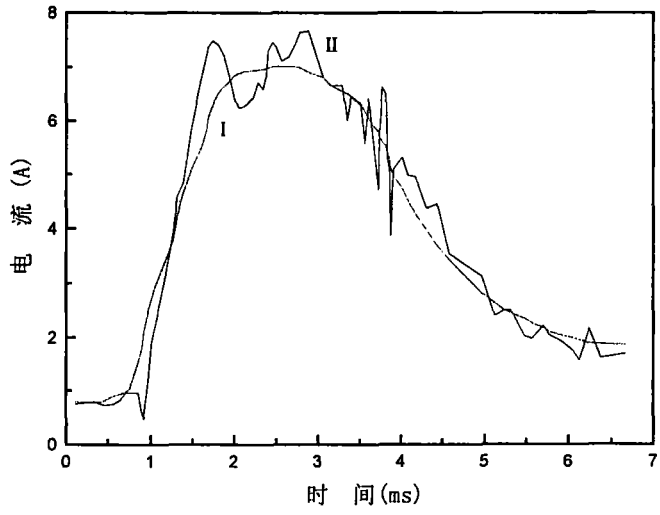


图 6－20　线圈电流的变化规律（I 为模拟结果，II 为试验结果）

Figure 6－20　Changing laws of current（I-simulated results, II-measured results）

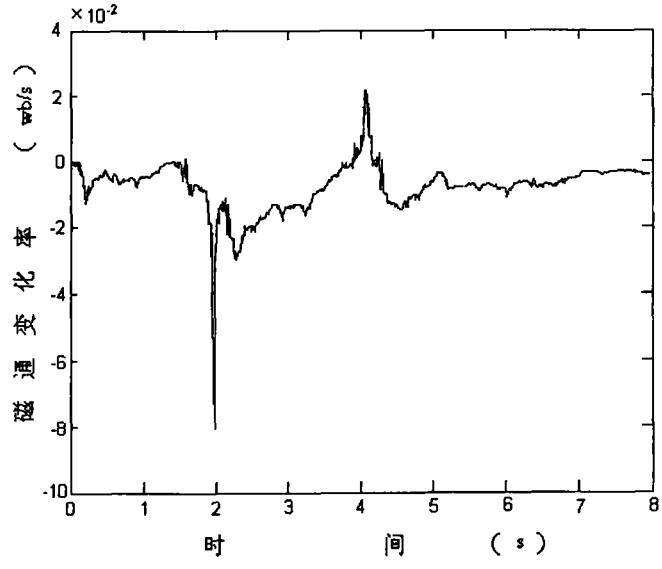


图 6－21　磁通变化率的变化规律

Figure 6－20　Changing laws of the rate of magnetic flux change

图 6-22 给出了在 PWM 驱动电压作用下，气门升程变化规律的模型仿真与试验测试曲线。从图中升程曲线可以看出，试验测试结果与仿真计算结果基本一致，但是在关闭或开启过程终止时，出现气门的冲击反弹过程，这是由于开环试验时通过计算机给出了一个仿真计算得到的理想的控制电压曲线，并没有加入反馈控制，因而未能实现气门运动的软着陆，气门运动时的振动、噪声比较大。另外，电磁气门运动的频率响应不高，为 14Hz，这主要是由于导磁体的磁响应时间较长和上、下两个弹簧的刚度较小造成的。

上述试验测试结果表明，研制出的电磁阀动态测试系统能够测量电磁阀工作过程中的线圈电流、磁通变化率和气门升程等物理量的变化规律，设计方案可行，另外，仿真计算结果与试验测试结果的趋势基本相同，因此利用该模型仿真程序可以进行 EMVA 机构的优化设计与分析。

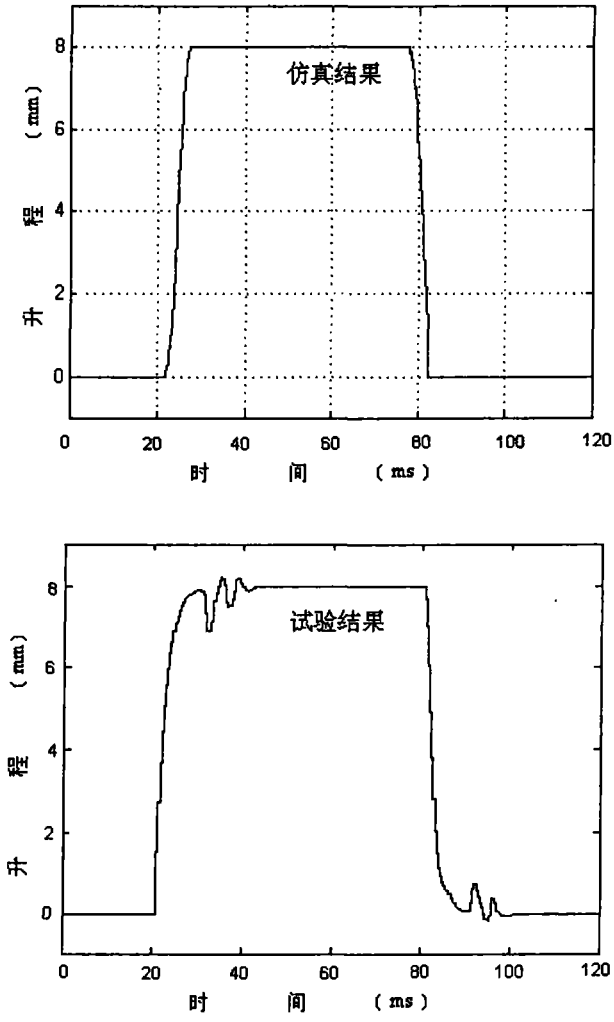


图 6－22　气门升程的变化规律

Figure 6－22　Changing laws of valve lift

但是，为了能够准确测量与分析电磁阀工作过程中有关物理参量的变化规律，特别是电磁力的变化规律，该测试系统还存在着一些需要改进之处。如：进一步合理设计测试架的结构，真正消除传力部件动态特性对测试结果的影响；采用计算机进行数据采集与处理，利用软件功能增强试验数据的分析与处理能力，使测试系统扩展成为测试与分析系统。

利用计算机进行数据采集与处理，可以有效利用软件处理功能。通过位移传感器直接获得升程变化规律后，利用软件功能，经一次微分可以得出速度变化规律，经二次微分得出加速度的变化规律。通过探测线圈测得磁通变化率后，经软件积分很容易得到难于测量的磁通量变化规律。这样可减少传感器的种类和数量，简化电路的设计。当然，在数据处理时需要对测试数据进行滤波等平滑处理，否则经微分计算后所得的速度和加速度的数据误差较大，甚至很难获得光滑的、有规律的变化特性。

测试架设计的改进主要是设计一个能够同时测量电磁力、线圈电流以及气门升程的综合台架，采用能够进行较高频响动态测量的压电式力传感器和频率响应较好的非接触式的位移传感器，尽可能消除由于仪器造成的测试误差，保证各物理量的测量精度。

6.3.3 电磁可变气门的设计改进

应用于发动机上的新型配气机构——电磁可变气门的严格、苛刻的工作条件，要求它必须具有高速、强力以及行程较大的性能要求。这种特殊的工作条件使其与常规的交、直流电压驱动的电磁阀有着较大的不同[88]。

常规的直流电磁阀采用直流电源励磁，一般通电时间较长，电流上升与下降过程占据的时间相对较短，要利用的是电流的稳恒阶段，这时通过磁路的磁通是不随时间变化的恒定磁通，不会产生磁滞损耗和涡流损耗。交流电磁阀采用交流电源励磁，通过其磁路的磁通是随时间作周期性变化的交变磁通，这样在其磁导体中必然产生磁滞损耗和涡流损耗。而在高频脉冲电压激励条件下工作的电磁阀，电流上升与下降过程在一个脉冲期间占有很大的份值，通过其磁路的磁通随时间发生非常剧烈的变化，这将在导磁体中产生很大的涡流和磁滞损耗，出现明显的磁响应时间，导致产生的动态电磁力出现滞后，严重影响电磁阀的在行程较大情况下的高速要求。

基于上述分析可知，在设计电磁可变气门时不能仅以直流磁性能指标作为设计依据，还应强调其工作条件的特殊性，重点考虑动态电磁特性对其工作过程的影响。第三章的仿真计算表明，在影响电磁气门的众多参数中，涡流的影响较为显著。

为了减小导磁体中的涡流，通常将铁心做成叠片式结构，我们自行研制的电磁阀已经采用了这一方法。但是，降低涡流影响、减小磁响应时间的最有效方法选用高电阻率的性能优异的软磁材料制作导磁体。例如，可以采用铁基非晶合金代替硅钢片来制作电磁阀的静铁心。与硅钢相比，这种材料具有以下典型的特点：

（1） 高导磁率、低矫顽力，可以提高电磁铁的效率；

（2） 低损耗，相当于硅钢的 1/3～1/5，可以降低电磁铁的温升；

（3） 低激磁电流，可以减小空载电流和线圈铜损；

（4） 良好的温度稳定性和时效稳定性，可以在 130℃长时间工作。

表 6－1 给出了铁基非晶合金与硅钢材料的磁性能的详细比较[89]。

表 6－1 铁基非晶合金与硅钢片的磁性能对比

Table 6－1　Magnetic property contrast of ferrous amorphous alloy silicon steel

性能指标	铁基非晶合金	硅钢
饱和磁感(T)	1.56	2.03
矫顽力(A/m)	<4	<30
最大磁导率 (H/m)	45×10^4	4×10^4
铁损(W/kg)	50Hz，1.3T 下<0.2	50Hz，1.7T 下=1.2
激磁功率(VA/kg)	50Hz，1.3T 下<0.5	50Hz，1.7T 下<0.83
电阻率(μΩ•cm)	130	45
比重(g/cm^3)	7.18	7.65
维氏硬度(HV)	900	181
厚度(μm)	30	300

由表中的数据可以看出，铁基非晶合金的磁性能比硅钢片的要优越许多，尤其是它具有较高的电阻率和较低的矫顽力，使得它的磁响应时间和涡流影响比硅钢材料要大大缩小，用这种材料制作电磁阀的静铁心将会显著提高电磁气门的关闭与开启过程响应速度。鉴于时间和经费的关系，目前我们还没有进行电磁气门改进设计的对比试验。

图 6－23 给出了目前我们自行研制的电磁全可变气门的实机装配结构外形。

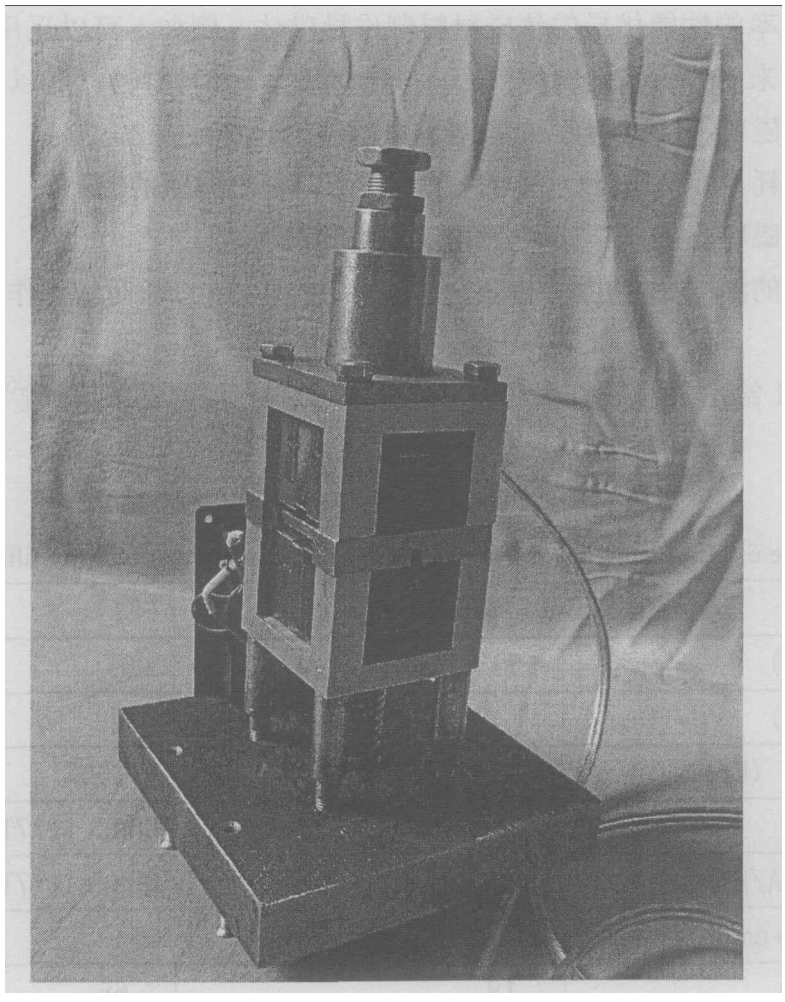


图 6－23 电磁可变气门的机构外形

Figure 6－22 Assembly diagram of EMVA

6.3.4 电磁可变气门的软着陆

根据发动机实际工作的要求确定气门落座时力的大小，就可以通过静吸力特性曲线在一定程度上确定在维持阶段线圈所通电流的大小，这是因为动态磁化过程和静态磁化过程存在着很大差异，为获取相同大小的电磁作用力，在动态过程中需要有比静态过程中大得多的线圈电流。而电磁气门的实际运动速度也是取决于动态磁化过程中产生的电磁力，而不是静态作用力。另一方面需要注意的是在气门运动过程中接近落座或接近全开时，电磁铁对电流和气隙的变化是很敏感的。在气隙不变时较小电流的微小变化，都会引起很大的电磁力的变化，在电流不变

的情况下气隙的微小变化也会导致电磁力的很大变化。因此在这种情况下，如果气门发生反弹，为了确保电磁力大于弹簧力的同时又不产生较大能耗，需要通过大量的仿真计算和试验来确定在实现软着陆过程中电磁线圈的电流变化的规律。

在开环控制中对于软着陆的实现，主要是通过调整 PWM 波的占空比改变电磁线圈的电流来获得的。从试验中可以发现过大过小的电流对实现软着陆和电磁阀的高速动作都不利。过大电流会使气门撞击座圈或者衔铁撞击铁心的力很大，从而造成气门或衔铁的反弹，导致不良后果；电流过小又会使响应时间延长，并且可能造成在平衡位置附近振荡而无法落座。因此，气门在往复运动中能否确保快速落座和软着陆是一对相互矛盾的问题，而且随着发动机转速提高，电磁阀的软着陆问题就越突出，因此，要解决软着陆问题，必须开发 EMVA 机构的闭环控制系统。

本章小节

本章设计了EMVA机构的静态和动态试验装置和测试系统，研究了该机构的静吸力特性和动态电磁特性，为EMVA机构进一步的优化设计打下了基础。试验结果表明，设计的机构能够按照其工作原理和控制系统的要求运动，运用模型仿真计算方法能够进行电磁气门有关工作性能的预测。在动态试验过程中，气门能否确保落座和气门软着陆是一对矛盾，仅通过开环控制简单地调节线圈电流大小、通电时间很难解决这一矛盾，需要进行闭环控制才能实现可靠落座和气门软着陆。

第七章 全文工作总结及展望

电磁全可变气门技术（EMVA）是发动机设计及其电子控制技术的前沿课题之一。EMVA取消了发动机传统气门机构中的凸轮轴及其从动件，利用电磁铁产生的电磁力来驱动或控制气门运动，它可以根据变化的工况来不断调整气门的运动参数，从而能够获得更好的燃油经济性，更高的扭矩和功率，提高怠速稳定性和降低排放。目前，发展电磁全可变气门机构、促进其尽快走向实用化需要解决的关键问题有：系统响应速度不高、气门落座冲击速度较大以及消耗能量过多等。

本文根据国内外可变气门的研究和发展状况，对电磁全可变气门系统进行了理论上和试验上的系统深入研究。

1. 本文的主要研究成果

1） 通过研究电磁全可变气门的工作过程变化规律与工作特性要求，建立了其物理模型和数学模型，基于 MATLAB/SIMULINK 的仿真计算结果，分析了驱动电压、弹簧刚度、运动质量以及涡流等不同工作参数对电磁气门工作响应过程的影响规律，为电磁阀的设计制作提供可靠的参数和依据。

2） 根据仿真计算结果和国外的研究开发经验，对电磁全可变气门机构进行了实用性开发，包括磁性材料的选择、静铁心与衔铁的结构设计、电磁线圈和弹簧的设计以及电磁气门整体装配联接件的设计等多方面的内容，为试验研究打下了基础。

3） 研究了电磁全可变气门这个多变量、强耦合的复杂非线性系统的控制策略，设计了以位移输出为系统状态反馈量的两种控制系统：PID 控制和反馈－前馈迭代学习控制。仿真计算结果表明，后者具有明显的优越性，从理论上能够实现对理想气门轨迹的高精度跟踪，满足系统对位移特性、响应特性、稳定性以及软着陆的要求。

4） 完成了较为完整的 EMVA 系统的电控单元软硬件设计，主要包括 ECU 结构总框图、单片机选择及其资源配置、功率驱动电路以及其它接口电路的设计与制作、ECU 软件总流程及各模块的设计过程等。

5） 功率驱动模块的设计决定了外部能量以何种具体形式输入系统，它不仅影

响输入能量的大小，而且还影响输入能量的变化速率，直接关系到电磁气门能否实现快速响应等工作性能，经多种方案分析比较，设计了脉宽调制式功率驱动电路，它可以通过改变占空比来控制输出电压，得到理想的电流值，为电磁可变气门能够高速强力地工作提供了保障。

6）　研制了与 EMVA 机构相配套的静态和动态试验测试系统。其中，静态测试系统能够测试机构的电磁作用力与线圈电流的变化规律，据此可以分析和探讨 EMVA 机构的电磁特性。动态测试系统能够实时测取电磁气门工作过程中的电流、磁通量和气门升程等物理量的变化规律，为更合理地确定电磁气门的各种参数，如弹簧刚度和预紧力、升程和残余间隙等，提供了可靠的依据。

7）　完成了电磁全可变气门机构的静态试验和开环控制的动态试验，为电磁气门的进一步优化设计提供了依据。根据试验结果可知，仿真计算结果与试验结果的趋势一致，因而能够对机构的性能进行预测；研制的硅钢片电磁阀能够产生足够大的电磁作用力使气门在 8mm 的大行程内往复运动，但是由于没有加入反馈控制，因而未能实现气门运动的软着陆。另外，电磁气门运动的频率响应不高，为 14Hz，这主要是由于导磁体的磁响应时间较长造成的。据此，对测试系统和电磁阀提出了改进建议，比如选用高电阻率的性能优异的软磁材料——铁基非晶合金代替硅钢片来制作导磁体，同时适当调整系统的弹簧刚度和运动质量也能改善系统响应特性。

2. 本文的创新

本论文所研究的内容属于国外发动机先进技术的跟踪课题，而国内才刚刚起步。论文的初步成果为电磁全可变气门的进一步研究打下了良好的理论和试验基础。论文的主要创新：

1）　为了尽可能减少电磁铁的磁滞损耗和涡流损耗以降低能量消耗，在国内首先设计制作了一套高电阻率的矩形硅钢片堆叠铁心、双弹簧系统的电磁全可变气门机构。

2）　在国内首先对电磁全可变气门系统的控制策略进行了系统地研究。设计了PID控制和反馈－前馈迭代学习控制方法，并对这两种控制方法进行了比较，后者具有明显的优越性。迭代学习控制是一种具有学习能力的智能控制方法，本文利用反馈－前馈迭代学习控制方法，成功地实现了对期望轨

迹的快速完全跟踪，并且通过仿真计算从理论上能达到气门软着陆控制。

3） 国内首先采用自行设计的动态试验台，对电磁全可变气门系统进行动态试验，虽然尚不完善，但为电磁全可变气门的设计和优化提供了依据。

3. 今后工作的展望

由于时间和条件的限制，使得本文所做的研究工作十分有限，对EMVA机构仅进行了探索性的研究工作，相关的研究还需要进一步拓展，综合起来大概有以下几点：

1） 和国外研制的EMVA机构相比，我们自行研制的EMVA机构体积比较大，响应速度低。要想实现产品化还必须进一步减小机构体积，采用高导磁率、低矫顽力的性能优异的软磁材料可以有效地减小静铁心的体积，提高响应速度，这方面的研究工作还有待于进一步开展。

2） 进一步改进电磁气门的机械结构，对静铁心、衔铁、弹簧、线圈及整体装配联接件进行优化设计，提高加工精度，从而最大限度地缩小机构体积，减少运动中的摩擦阻力，降低气门的落座冲击速度。

3） 开发的电控单元ECU还需要进一步的完善。目前，电控单元ECU完成了开环控制部分，因此只进行了相应的开环试验。进行闭环反馈试验，需要进行ECU信号采样电路、传感器接口电路等硬件设计，以及采样与滤波程序、中断事件、各种数据的计算处理等软件设计。

4） 试验测试系统有待于进一步的完善和提高。为了更好地对电磁气门的动态响应特性进行测量，可以采用能够进行较高频响动态测量的压电式力传感器、频率响应较好的非接触式的位移传感器来进一步提高测量精度；通过计算机进行数据采集与处理，使测试系统扩展成为测试与分析系统。

5） 一步对现有的仿真模型进行研究。因为目前的模型忽略了燃气阻力对气门运动过程的影响，因此还不能精确模拟电磁气门实机运行时的情况。另外，目前的模型仅研究了单个气门的运动规律，为了实现对进、排气门同时运动情况下的控制，使其在不同运转工况下实现不同的气门重叠角，从而能够获得不同的气门升程以及气门开启持续时间，必须在现有模型的基础上将其进一步完善和提高。

参 考 文 献

[1] 陶明德. 国内外机动车排放与控制概况. 上海汽车,1997(6): 7~10。

[2] 劭显龙，可变配气机构的种类、构造和未来动向，汽车研究与开发，2001 年第 4 期。

[3] Michael M. Schechter and Micheal B. Levin , Camless Engine , SAE 960581.

[4] Martin Pischinger , Wolfgang Salber , Frank van der Staay, Henning Baumgarten , Henning Baumgarten , Hans Kemper, Low Fuel Consumption and Low Emissions—Electromechanical Valve Train in Vehicle Operation , Seoul 2000 FISIYA World Automotive Congress June 12-15, 2000, Seoul, Korea.

[5] Dr Martin pischinger, A new opening , Engine Technology International.

[6] Mark A Theobald, Lequesne B,Henry R.Control of Engine Load via Electromagnetic Valve Actuators[C]. SAE Paper940816,1994

[7] Henry R P,Lequesne B. A Novel,Fully Flexible,Electro-Mechanical Engine Valve Actuation system[C]. SAE Paper 970249,1997

[8] FEV(1999). Electromechanical Valve Control, http ://www.fev.com/f_index.html.

[9] 张育华等，内燃机采用电磁驱动气门机构的探索，内燃机学报，1988 年 1 期。

[10] 李红艳，赵雨东，发动机无凸轮轴气门驱动的研究与进展，车用发动机，2001 年 4 月。

[11] Thomos Dresner and Phillp Barkan. A Review and Classification of Variable Valve Timing Mechanisms. SAE 890674.

[12] Ma T. H., 1986, " Recent Advances in Variable Valve Timing," Alternative and Advanced Automotive Engines, Plenum Press, 1996.

[13] Grohn M. and Wolf K., " Variable Valve Timing in the new Mercedes-Benz Four-Valve Engines", SAE paper No.891990, 1989.

[14] Moriya Y., Watanabe A., Uda H., Kawamura, H., and Yoshioka M. " A Newly Developed Intelligent Variable Valve Timing System-Continuously Controlled Cam Phasing as Applied to a New 3 Liter Inline 6 Engines", SAE paper No.960579, 1996.

[15] http://www.bmwworld.com/technology.

[16] Kiyoshi Hatano, Kazumasa lida, Hirohumi Higashi, and Shinichi Murata. Development of a New Multi-Mode Variable Valve Timing Engine. SAE 930878.

[17] 关双城. 凸轮配气相位的连续调整. 小型内燃机 1988 (2)。

[18] Porsche 911 variocam page, http://www.us.porsche.com/english/911/turbo/engine/variocam.htm.

[19] Kinji Shibano and Shiji Damimaru. Takemasa Yamada and Kenzo Wanabe. A Newly Developed Variable Valving Mechanism with Low-Mechanical Friction. SAE 920451.

[20] Masato Matsuki, Kenji Nakano, Tohru Amemiya, Yuichim Tanabe, Daisuke Shimizu, and Ichirou Ohmura. Development of a Lean Burn Engine with a variable Valve Timing Mechanism. SAE 960583.

[21] Michael B. Riley, Mark McElwee and Russell Wakeman. A Mechanical Valve System with Variable Lift, Duration, and Phase Using a Moving Pivot. SAE 970334.

[22] Gould L., Richeson W., and Erickson F., "Performance Evaluation of a Camless Engine Using Valve Actuation with Programmable Timing", SAE Paper No. 910450, 1991.

[23] Seilly AH " Helenoid Actuators – A New Concept in Extremely Fast Acting Solenoids" SAE 790119, 1979

[24] Mardell JE and Cross RK. " An Integrated Full Authority, Electrohydraulic Engine Valve and Diesel Fuel Injection System" SAE 880602, 1988.

[25] Misovec KM, Johnson BG, Mansouri G, Sturman OE, and Massey S. " Digital Valve Technology Applied to the Control of an Hydraulic Valve Actuator" SAE99010825, 1999.

[26] Barros da Cunha S., Hedrick J.K., and Pisano A.P., " Variable Valve Timing By Means of a Hydraulic Actuator", SAE Paper No. 2000-01-1220, 2000.

[27] Michael M. Schechter and Micheal B. Levin , Camless Engine , SAE 960581.

[28] Volker F S, William E S. Gently Does It. Engine Technology International '98 Annual Review [J]. 1998:116~121

[29] 张育华等. 内燃机采用电磁驱动气门机构的探索，内燃机学报，1988年1期。

[30] Hideo Kawamura. Electromagnetic Valve Actuating System. U.S. Patent5406241. April 11, 1995

[31] Longstaff Kenneth, Holemes Stanley. Internal Combustion Engine. U.S. Patent3882833. May 13, 1975

[32] Pischinger M, Salber W, Frank V S, et al. Benefits of the Electromechanical Valve Train in Vehicle Operation . SAE Paper 2000-01-1223,2000

[33] FEV(1999). Electromechanical Valve Control, http ://www.fev.com/f_index.html

[34] Wang Y., Stefanopoulou A., Haghgooie M., Kolmanovsky I., Hammoud M.,

" Modeling of an Electromechanical Valve Actuator for a Camless Engine", AVEC 2000, 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, No.93, Augues 2000, Ann Arbor, USA.

[35] Goldste R J. Variables of Electromagnetic Valve Actuator Performance [J]. Engine Technology International. November, 1997:84~88

[36] Lequesne Bruno. Fast-Acting, Long-Stroke Solenoids with Two Springs. IEEE Transactions on Industry Applications, Sept/Oct., 1990, Vol.26,No.5:848~856

[37] 赵雨东等，电磁气门驱动设计及其电磁铁静吸力特性试验，内燃机学报，2002年第四期。

[38] 汪波等，发动机电磁气门驱动开环控制系统设计与试验，汽车技术，2002.11。

[39] Shibano K et al. A Newly Developed Variable Valving Mechanism with Low-Mechanical Friction. SAE 920451.

[40] Urata Y., Umiyama H., Shimizu K., Fujiyoshi Y., Sono H., and Fukuo K., "A Study of Vehicle Equipped with Non-Throttling SI Engine with Early Intake Valve Closing," SAE paper No.930820,1993.

[41] Kreyuter P et al. Strategies To Improve SI –Engine Performance By Means of Variable Intake Lift, Timing And Duration. SAE 920449.

[42] Ronald J P, James F B. Design and Development of a Mechanical Variable Valve Actuation System [P]. SAE Paper 2000-01-1221, 2000

[43] Butzmann S, Melbert J. Sensorless Control of Electromagnetic Actuators for Variable Valve Train [P]. SAE Paper 2000-01-1225, 2000

[44] Tai C, Stubbs A, and Tsao TC, "Modeling and controller Design of an Electromagnetic Engine Valve" Proceedings of 2001 American Control Conference.

[45] Gunter Schmitz. Method of Regulating the Armature Impact Speed in an Electromagnetic Actuator by Estimating the Required Energy by Extrapolation. U.S. Patent 6141201. Oct.31,2000

[46] Hoffmann W. and Stefanopolou A.G., "Iterative Learning Control of Electromechanical Camless Valvetrain Actuator ", Proceedings American Control Conference, June 2001.

[47] Dr Martin pischinger, A new opening , Engine Technology International.

[48] 顾启泰，应用仿真技术，国防工业出版社，1992。

[49] 何衍庆，过程仿真，中国石化出版社，1996。

[50] 李彬轩，柴油机电控单元在环仿真系统的设计及相关研究，浙江大学博士学

位论文，2001。
[51] Y. Wang, T. Megli , M. Haghgooie, K. S. Peterson and A. G. Stefanopoulou, Modeling and Control of Electromechanical Valve Actuator, SAE paper 2002-01-1106, 2002.
[52] 卢启龙， 电控直列泵－管－阀－嘴柴油喷射系统高速强力电磁阀的研究，清华大学博士学位论文，1998。
[53] 尚汉冀，内燃机配气凸轮机构——设计与计算，复旦大学出版社，1988。
[54] 张冠生，陆俭国，电磁铁与自动电磁元件，机械工业出版社，1982。
[55] Rolf Isermann, Stefan Sinel, Jochen Schaffnit, Modeling and Real-time Simulation of Diesel Engines for Control Design. SAE 980796.
[56] 范影乐等，MATLAB 仿真应用详解，北京：人民邮电出版社，2001。
[57] 任耀先，电磁铁优化设计，北京：机械工业出版社，1990。
[58] 孟庆龙，电器制造工艺学，北京：机械工业出版社，1992。
[59] FEV(1999). Electromechanical Valve Control, http ://www.fev.com/f_index.html
[60] Goldste R J. Variables of Electromagnetic Valve Actuator Performance [J]. Engine Technology International. November, 1997:84~88
[61] Dennis Bulgatz,etc,Electromagnetic actuator with Detached Lower Collar to Align with Cylinder Head Bore, U.S. Patent 6044813. Apr. 4, 2000.
[62] 董景新等，控制理论基础，清华大学出版社 ，1992。
[63] [美] Katsuhiko Ogata 著，现代控制工程，电子工业出版社，2000。
[64] Fu K S, Learning control system-review and outlook. IEEE Transactions of Automatic Control, 1970, Vol. AC-15.
[65] U.S.-Japan Seminar on Learning Control and Intelligent Control,1973.
[66] Uchiyama ,M., Formulation of high speed motion pattern of a mechanical arm by trail. Trans. Of Sci., No.14:706-712,1978.
[67] Arimoto S, Kawamura S and Miyasaki F., Bettering operation of robots by Learning[J]. J.Robot. Syst., 1984,1(2):123-140.
[68] Hoffmann W. and Stefanopolou A.G., "Iterative Learning Control of Electromechanical Camless Valvetrain Actuator ", Proceedings American Control Conference, June 2001.
[69] 孙明轩、黄宝健著，迭代学习控制，国防工业出版社，1999。
[70] Arimoto, S. Kawanura, F. Miyazaki, and S. Tamaki. "Learning control theory for dynamical systems," Proceedings of the 24th Conference on Decision and Control, Vol. 3, p. 1375 (1985).

[71] Hac A. "Learning control in the presence of measurement noise". Proceedings of 1990 American Control Conference, 1990, 2846-2851.

[72] Kuc T Y, Lee J S. Learning strictly positive real linear systems with uncertain parameters and unknown input disturbances. Automatica, 1996,32(5):791-792.

[73] Chen, Y., J.X. Xu and T.H. Lee, 1996, Current iteration tracking error assisted iterative learning control of uncertain nonlinear discrete-time-systems, 35-th IEEE Conference on Decisin and Control, Kobe, Japan, 3040-3045.

[74] Messner, W., Horowitz, R., Kao, W., Boals, M., "A New Adaptive Learning Rule,"
IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 36, No.2 pp.188-197 (1990)

[75] Willam E.Edwards, Eric Danstrom, and Mitchell Belser. Single chip power system for engine controolers. SAE paper 960332. P(440-445).

[76] 常久鹏，张幽彤等，模糊控制理论在柴油机电控喷油系统中的应用。汽车技术，1998. 10。

[77] S.V.Yudanov. Development of the hydraulically actuated electronically controlled unit injector for diesel engines. SAE paper 952057.

[78] Naoki Tomisawa and Tatsuji Ohkubo. An integrated software development environment for electronic control units. SAE paper 960044.

[79] 李东升等编著，Protel 99SE 电路设计技术入门与应用，电子工业出版社，2002. 7。

[80] Willam E.Edwards, Eric Danstrom, and Mitchell Belser. Single chip power system for engine controllers. SAE paper 960332.

[81] 潘旭峰，马彪，汽车电子控制系统的核心—ECU，汽车电子，1998 年第 8 期。

[82] 孙涵芳等编著，Intel 16 位单片机，北京航空航天大学出版社，1995 年 11 月。

[83] 检测达林顿管(DT)的方法，http://topdog.nease.net/e_basic/new_page_40.htm。

[84] 方鸿发，贾继钧，电器测试技术，北京：机械工业出版社，1994。

[85] 秦祖荫，霍尔电流传感器的性能及其使用，电力电子技术，1994.（4）。

[86] 贺湘琰主编，电器学，北京：机械工业出版社，1995。

[87] 王宝龄. 电磁电器设计基础， 北京：国防工业出版社，1989。

[88].严威利、邹道元，自动电磁元件，北京：机械工业出版社，1989。

[89] http://www.amorphous.com.cn。

攻读博士期间发表的论文：

1. 严兆大、王希珍等， 电磁控制全可变气门系统及其仿真，《内燃机工程》2002 年（第 23 卷）第四期，pp:10－12。

2. 王希珍、严兆大、周军，柴油机缸套热负荷评估的分析及实验研究方法，《内燃机工程》2001 年（第 22 卷）第四期，pp:62－65。

3. 王希珍、严兆大等， 活塞热冲击有限元分析，《内燃机学报》，2002 年（第 20 卷）第六期，pp：564-568。

4. 王希珍等，基于仿真基础上的电磁控制全可变气门优越性的分析，《内燃机工程》，已录用。

5. 周重光，严兆大，王希珍等，“空燃比对 LPG 发动机排放特性的研究”《内燃机工程》2002 年（第 23 卷）第五期，pp:23－26。

6. Yan Zhaoda, Zhou Chongguang, Su Shichuan，Wang xizhen，Cao yunhua，Application of Neural Network in the Study of Combustion Rate of the Natural Gas/Diesel Dual Fuel Engine,《Journal of Zhejiang University》 SCIENCE，2003 年第二期，pp：170－174

致　　谢

回首三年半的博士研究生学习生活，感觉收获颇丰。首先非常有幸能够在知名学者严兆大教授的亲自指导下攻读博士学位，严老师以其渊博的学识和宽广的胸怀指导我们钻研学问和如何做人，导师那出众的学术造诣、丰富的科研经验、高度的责任心、诲人不倦的敬业精神，平易近人的处世方式，深深地激励着我完成学业。严老师不仅在学习和科研上对我进行悉心指导，而且在生活上给予我无微不至的关怀。值此论文完成之际，谨向我敬爱的严老师表示深深地谢意，并祝他永远健康！

非常感谢俞小莉教授在学习上和生活上给予的关心、指导和帮助，俞老师那勇于创新、锐意进取的开拓精神和高效求实的工作作风，为我们树立了一个学习的楷模。

感谢一汽集团无锡油泵油嘴研究所在课题进行中给予的多方面支持和帮助，特别感谢董尧清教授、居钰生教授级高工给予的指导。

特别感谢合肥工业大学的周军老师在本文的试验研究阶段所给予的大力支持和帮助，周老师的教诲使我受益匪浅，在此表示深深的谢意。

感谢美国加州大学的 Wang yan 博士、Purdue 大学的 Zhang cheng 博士在查阅文献资料方面给予的热心帮助。

感谢苏石川博士、周重光博士、李莉博士和曹韵华博士在学习和生活上对我的热情帮助，难忘与他们共同学习奋斗的日子。

感谢元广杰博士、伍茜博士、周迅博士、顾洁硕士、蔡京雷硕士、李建锋硕士、王玉端硕士等给予的支持，从他们身上看到了刻苦钻研、不断进取的精神和充满朝气的生活态度。祝他们顺利完成学业，在事业上取得更大成就！

感谢廖彬博士、潘维博士、赵鸣志硕士等，陪我渡过了许多值得记忆和回味的美好时光。

最后衷心感谢亲爱的爸爸妈妈和弟弟，他们殷切的期望和无私的关爱是我不断前进的源泉和动力。

王希珍

2003 年 11 月 20 日于求是园